

# Medios de propulsión eólica alternativos a la vela tradicional.

Proyecto Final de Carrera

Licenciatura en Náutica y Transporte Marítimo

Facultad de Náutica de Barcelona

Junio 2012

Autor: Gregori Colomar Lix

Directora: Marcel·la Castells







## Objetivo del trabajo.

Ante la aparición de diversas razones que cuestionan cual debe ser el origen de la energía para propulsar los buques del futuro, se ha pretendido identificar cuáles son las tecnologías actualmente disponibles para la propulsión de buques a partir de la fuerza del viento, analizando su evolución histórica, sus características, sus rendimientos y sus posibles aplicaciones futuras.

Debido a las numerosas consecuencias que tienen con el entorno natural, las exigencias relativas a contaminación atmosférica, son cada vez más exigentes en el transporte marítimo internacional, ya sea por el cambio climático, o por problemas de lluvia acida. Además, el precio de los combustibles cada vez es más elevado, debido al proceso de refinamiento que requieren para extraerle sustancias contaminantes como el azufre. Si se tiene en cuenta la variación del precio del crudo, debido a las tensiones políticas internacionales, y a hechos totalmente inconexos con el transporte marítimo, parece necesario investigar sobre las posibles alternativas.

Existen sistemas alternativos a la vela tradicional, que permiten obtener una propulsión adicional de los buques que navegan bajo condiciones de viento. Tanto las velas tipo ala como los rotores Flettner y las cometas, aprovechan la diferencia de las velocidades del viento en sus superficies, para desplazar el buque gracias a la consecuente diferencia de presiones entre sus caras.

Como el viento es un recurso que se encuentra fácilmente en determinadas zonas oceánicas, se ha realizado un estudio de la ocurrencia de los mismos en una ruta entre Europa y América del Norte, clasificándolos en función de su velocidad y su procedencia.

Finalmente se han representado los principales ahorros sobre un diagrama polar en función de las diferentes velocidades del viento aparente, y se valoran las conclusiones obtenidas del estudio de los vientos en la ruta predeterminada.



# Índice

Índice	i
Nomenclatura	ii
Lista de Abreviaturas	iii
Lista de Figuras	iv
1. Introducción	Pág. 1
2. Evolución del precio del crudo	Pág. 3
3. Normativa relativa a la contaminación atmosférica	Pág. 7
3.1. Gases contaminantes	Pág. 9
3.2. Gases de efecto invernadero	Pág. 12
4. El viento en navegación	Pág. 18
5. Introducción a la propulsión eólica	Pág. 23
5.1. Principios aerodinámicos	Pág. 25
5.1.1. Los perfiles aerodinámicos	Pág. 25
5.1.2. Las fuerzas que actúan sobre los perfiles aerodinámicos	Pág. 27
5.1.3. El viento aparente a bordo de un buque en navegación.	Pág. 29
5.1.4. Las fuerzas sobre el buque con velas tipo ala	Pág. 32
6. Descripción de los sistemas de propulsión	Pág. 33
6.1. Las velas	Pág. 33
6.1.1. Tradicionales	Pág. 34
6.1.2. Rígidas	Pág. 39
6.1.3. Efectos de aletas sumergidas sobre la escora y deriva del buque	Pág. 56
6.2. Los Rotores Flettner	Pág. 58
6.2.1. Evolución Histórica	Pág. 58
6.2.2. Las Turbovelas	Pág. 61
6.2.3. Descripción del empuje creado por un cilindro en rotación	Pág. 64
6.2.4. Aplicaciones actuales	Pág. 67
6.3. Las Cometas	Pág. 75
6.3.1. Introducción	Pág. 75
6.3.2. Evolución histórica de las cometas	Pág. 77
6.3.3. Las fuerzas sobre una cometa	Pág. 79
6.3.4. La envoltura de vuelo	Pág. 81
6.3.5. El ángulo de ataque de una cometa	Pág. 82
6.3.6. Fuerzas ejercidas por una cometa sobre el buque remolcado	Pág. 83
6.3.7. Implementación de una cometa de $500m^2$	Pág. 87
6.3.8. Aplicaciones actuales y perspectivas de futuro	Pág. 90

7. Generación eléctrica auxiliar	Pág. 93
7.1. Cometas	Pág. 93
7.2. Turbinas eólicas	Pág. 96
7.2.1. Aerogeneradores de eje horizontal	Pág. 97
7.2.2. Aerogeneradores de eje vertical	Pág. 100
8. Análisis de los vientos en una ruta predeterminada por el Atlántico Norte.	Pág. 107
8.1. Enero	Pág. 109
8.2. Abril	Pág. 113
8.3. Julio	Pág. 116
8.4. Octubre	Pág. 119
9. La Navegación meteorológica	Pág. 124
10. Conclusiones	Pág. 126
11. Bibliografía	Pág. 130
12. Anexos	Pág. 135
Anexo A: Buques a motor asistidos por viento mediante velas convencionales	Pág. 134
Anexo B: Influencia de la relación entre la velocidad del buque y la velocidad del viento verdadero, sobre la velocidad del viento aparente.	Pág. 138
Anexo C: Historiales en una travesía de Yokohama a Seattle con cascada de velas propuestas por UT WindChallenger	Pág. 141
Anexo D: Especificaciones del buque CargoXpress con vela estructural	Pág. 142
Anexo E: Velas rígidas propuestas por Wärtsila	Pág. 146
Anexo F: Diversas distribuciones de los rotores propuestos por Thiiink	Pág. 147
Anexo G: Cálculo de las fuerzas ejercidas sobre una cometa de $500m^2$	Pág. 150
Anexo H: Representación de los coeficientes de rendimiento en función de la velocidad específica para los diferentes tipos de aerogeneradores de eje vertical	Pág. 151
Anexo I: Estadística del viento en la ruta por el Atlántico Norte	Pág. 152





### **Lista de abreviaturas.**

OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
OMI	Organización Marítima Internacional
IMO	International Maritime Organization
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MEPC	Marine Environment Protection Committee
CPMM	Comité de Protección del Medio Marino
ECA	Emission Control Area
SECA	Sulfur Emission Control Area
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
BIMCO	Baltic and International Maritime Council
DNV	Det Norske Veritas
LR	Lloyd's Register
LNG	Liquefied Natural Gas
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical.
QuickSCAT	Quick Scatterometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
EHP	Effective Horse Power
BHP	Brake Horse Power
CFRP	Carbon-fiber-reinforced polymer
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
FE	Flight Envelope of a kite
KSU	Kite Steering Unit
NMPC	Non-linear Model Predictive Control
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine

VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
CFD	Computational Fluid Dynamics
ISO	International Organization for Standardization
COGOW	Climatology of Global Ocean Winds
TS	Traditional Square rig
MS	Modern Square DYNA
RS	Rigid Square rig
TG	Traditional Gaff
BM	Bermuda Main sail
SW	Sail Wing
WSTE	Wing Sail with trading edge flap
FR	Flettner Rotor

#### Lista de símbolos.

$P ; P_t$	Presión total en un punto dado.	[Pa]
$P_e$	Presión estática	[Pa]
$P_d$	Presión dinámica	[Pa]
$\rho$	Densidad de un fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]
$V ; V_f$	Velocidad del fluido	[m/s]
$k$	Constante	
$T_{af}$	Fuerza Aerodinámica Total	[N]
L	Fuerza de Sustentación	[N]
C	Resistencia Aerodinámica o Arrastre	[N]
$C_L$	Coeficiente de sustentación	
$C_D$	Coeficiente de resistencia aerodinámica o arrastre	
$C_L/C_D$	Eficiencia Aerodinámica	
$A ; SA$	Área o Superficie velica	[m <sup>2</sup> ]

$V_A ; TWS$	Velocidad del viento aparente	[m/s]
$V_V$	Velocidad del viento verdadero	[m/s]
$V_B$	Velocidad del buque	[millas/hora]
$AV_V ; TWA$	Ángulo del viento verdadero	[grados]
$DV_V$	Dirección del viento verdadero	[cardinales]
$AV_A$	Ángulo del viento aparente	[grados]
$FL; F_X$	Fuerza Longitudinal	[Tm]
$FT; F_Y$	Fuerza Transversal	[Tm]
$FL_t$	Fuerza Longitudinal Total	[Tm]
$FT_t$	Fuerza Transversal Total	[Tm]
$C_X$	Coeficiente de empuje longitudinal	
$C_Y$	Coeficiente de empuje transversal	
$C_a$	Cámarade un ala	[%C]
C	Cuerda de un ala	[m]
$E_{pp}$	Eslora entre perpendiculares	[m]
M	Manga de un buque	[m]
P	Puntal de un buque	[m]
C	Calado de un buque	[m]
$Fn$	Número de Froude	$[V/\sqrt{gL}]$
BHP	Potencia en el freno	[kW]
EHP	Potencia efectiva	[kW]
E	Energía	[kWh]
$C_{D0}$	Mínimo coeficiente de resistencia aerodinámica	
$C_{C1}$	Máximo coeficiente de sustentación	
$C_{D1}$	Coeficiente de resistencia aerodinámica en $C_{C1}$	
$C_{D2}$	Máximo coeficiente de arrastre	
$U_{AV}$	Promedio de las velocidades del viento	[m/s]

$\vec{c}_0$	Vector de velocidad del viento aparente	[m/s]
$\vec{u}$	Vector de velocidad de la superficie del rotor	[m/s]
$\vec{c}_1$	Vector de velocidad del viento en la cara de mayor velocidad.	[m/s]
$\vec{c}_2$	Vector de velocidad del viento en la cara de menor velocidad.	[m/s]
$\omega$	Velocidad angular	[rad/s]
$G$	Fuerza del vórtice	[m <sup>2</sup> /s]
$V_r$	Velocidad de rotación	[m/s]
RPM	Revoluciones por minuto	[rev/s]
b ; r	Radio de un cilindro	[m]
$F_{XAV}$	Fuerza directiva media	[N]
$V_p$	Fuerza vertical	[N]
$H_p$	Fuerza horizontal	[N]
W	Peso	[kg]
$A_k$	Área de la cometa	[m <sup>2</sup> ]
$\beta$	Ángulo de brida	[Grados]
$\theta$	Inclinación de la línea de remolque	[Grados]
$\alpha_e$	Ángulo de ataque efectivo	[Grados]
$\alpha$	Ángulo de ataque	[Grados]
$\alpha_k$	Ángulo de atadura de la cometa	[Grados]
$v_t$	Velocidad tangencial	[m/s]
$v_{r-z}$	Velocidad radial	[m/s]
$v_{rel}$	Velocidad relativa	[m/s]
W(z)	Velocidad del viento a una altura z	[m/s]
r	Longitud de la línea de remolque de una cometa	[m]
$U_{ref}$	Velocidad conocida del viento a determinada altura	[m/s]
$z_k$	Altura de vuelo de la cometa	[m]
r	Longitud del cabo de remolque	[m]

$A_{RT}$	Área de la superficie de un rotor aerogenerador	$[m^2]$
$C_p$	Coeficiente Aerodinámico	
$M_{adriz}$	Momento adrizante	$[kg/m]$
$\rho_{mar}$	Densidad del agua de mar	$[kg/m^3]$
$\nabla$	Volumen sumergido de un buque	$[m^3]$
D	Desplazamiento de un buque	$[kg]$
$GM$	Altura metacentrica	$[m]$
$\Phi$	Escora de un buque	$[grados]$
$\lambda$	Relación de velocidad tangencial.	
$\Omega$	Velocidad rotacional de un rotor.	$[m/s]$
$R_{AB}$	Rumbo del punto A al punto B	$[grados]$
EEDI	Energy Efficiency Design Index	
EEOI	Energy Efficiency Operator Index	

### Lista de Tablas

Tabla 1: Capacidad de absorción de las radiaciones de los GEI	Pág. 8
Tabla 2: Factores EEDI relativos a la línea de referencia para cada tipo de buque	Pág. 15
Tabla 3: Características del sistema multi-alas	Pág. 45
Tabla 4: Características del granelero propuesto para cascada de velas	Pág. 48
Tabla 5: Estimación del empuje proporcionado por la cascada de velas propuesta	Pág. 49
Tabla 6: Especificaciones técnicas del buque E-Ship 1	Pág. 68
Tabla 7: Fuerza proporcionada por los diversos tipos de rotores Thiiink	Pág. 70
Tabla 8: Datos principales del buque propuesto por Thiiink	Pág. 70
Tabla 9: Típicos parámetros aerodinámicos de algunos tipos básicos de velas	Pág. 73
Tabla 10: Áreas de las cometas asumidas para 2020 en los diferentes tipos de buque	Pág. 92
Tabla 11: Potencia aproximada de los kites	Pág. 92
Tabla 12: Características de la cometa Kitves	Pág. 95

Tabla 13: Ahorros con turbinas eólicas y velas tipo ala	Pág. 99
Tabla 14: Rumbos establecidos para cada fase de la ruta	Pág.108
Tabla 15: Sectores favorables del viento en función del rumbo del buque	Pág.108
Tabla 16: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 1 en Enero	Pág.111
Tabla 17: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 2 en Enero	Pág.112
Tabla 18: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 1 en Abril	Pág.114
Tabla 19: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 2 en Abril	Pág.115
Tabla 20: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 1 en Julio	Pág.117
Tabla 21: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 2 en Julio	Pág.118
Tabla 22: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 1 en Octubre	Pág.120
Tabla 23: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 2 en Octubre	Pág.121
Tabla 24: Porcentaje de los vientos que superan los $10 \text{ m/s}$ de velocidad	Pág.122
Tabla 25: Porcentaje de los vientos que superan los $15 \text{ m/s}$ de velocidad	Pág.123
Tabla 26: Equivalencias escala Beauford	Pág.123
Tabla 27: Resumen de los vientos que superan los $10 \text{ m/s}$ de velocidad	Pág.127
Tabla 28: Porcentaje de los vientos que superan los $15 \text{ m/s}$ de velocidad	Pág.128
Tabla 29: Velocidad del buque igual a la del viento verdadero	Pág.138
Tabla 30: Velocidad del viento el doble que la velocidad del buque	Pág.139
Tabla 31: Velocidad del buque el doble que la velocidad del viento	Pág.140
Tabla 32: Energía eólica anual por día en las distintas rutas	Pág.145

### **Lista de Figuras**

Figura 1: Demanda específica de energía de los diversos modos de transporte	Pág. 2
Figura 2: Evolución de los precios del barril Brent en dólares	Pág. 3
Figura 3: Precios del crudo ajustados a la inflación	Pág. 4
Figura 4: Evolución del precio del barril de Brent en Londres	Pág. 5
Figura 5: Posible variación del precio del crudo por la tensión de Irán	Pág. 6

Figura 6: Mapa de las Zonas de Control de Emisiones. ECAs	Pág. 10
Figura 7: Calculadora del Índice de Diseño de Eficiencia Energética de BIMCO	Pág. 17
Figura 8: Hipotética circulación atmosférica de la Tierra sin rotación	Pág. 18
Figura 9: Modelo de tres células sobre circulación atmosférica	Pág. 19
Figura 10: Cinturones de presiones asociados a las células de circulación atmosférica	Pág. 20
Figura 11: Cinturones de presión "Ideales" y "Reales"	Pág. 21
Figura 12: Distribución de las zonas de presiones y vientos geostróficos asociados	Pág. 21
Figura 13: Velocidad del viento en superficie en los océanos. QuikSCAT. NASA	Pág. 22
Figura 14: Espectro de la propulsión por viento	Pág. 24
Figura 15: Representación del Teorema de Bernoulli	Pág. 25
Figura 16: Presión y velocidad en un ala	Pág. 26
Figura 17: Relación entre la cuerda y ángulo de ataque de un ala	Pág. 26
Figura 18: Fuerzas básicas sobre las alas	Pág. 27
Figura 19: Fuerzas actuantes sobre un plano aerodinámico	Pág. 27
Figura 20: Máximos coeficientes de sustentación de diversos sistemas de propulsión	Pág. 28
Figura 21: El viento aparente en navegación.	Pág. 29
Figura 22: Fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un buque con velas tipo ala	Pág. 32
Figura 23: Influencia del ángulo de ataque en las fuerzas aerodinámicas	Pág. 34
Figura 24: Influencia de la forma de la vela en los coeficientes aerodinámicos $C_L$ y $C_D$	Pág. 34
Figura 25: Influencia de la cámara en los coeficientes aerodinámicos $C_L$ y $C_D$	Pág. 35
Figura 26: Pruebas de mar M/V Mini Lace. 1981	Pág. 36
Figura 27: Potencia de la vela instalada en el buque Mini Lace	Pág. 36
Figura 28: Buque Wind Surf asistido con velas convencionales	Pág. 37
Figura 29: Buque Maltese Falcon con Dynarig	Pág. 38
Figura 30: Diseño del buque Ecoline con velas cuadras Dynarig	Pág. 38
Figura 31: Shin Aitoku Maru. 1970	Pág. 39
Figura 32: Usuki Pioneer.1985	Pág. 39



Figura 33: Presión sobre un ala en función del ángulo de ataque	Pág. 40
Figura 34: BMW Oracle con vela tipo ala	Pág. 41
Figura 35: Elementos que forman la vela tipo ala	Pág. 42
Figura 36: M/V Ashington	Pág. 43
Figura 37: Blue Nova	Pág. 43
Figura 38: Modern Windship. 1999	Pág. 43
Figura 39: Curva $C_L/C_D$ de los diferentes perfiles	Pág. 44
Figura 40: Diagrama Polar del $C_X$ de diversos sistemas	Pág. 44
Figura 41: Sistema Multi-alas	Pág. 45
Figura 42: Sistema multi-alas en un buque porta-contenedores de cabotaje	Pág. 46
Figura 43: Buque propulsado con 9 velas rígidas tipo ala	Pág. 46
Figura 44: Buque con 9 velas rígidas tipo ala plegadas en puerto	Pág. 48
Figura 45: Líneas de flujo y presiones de contorno de las velas rígidas	Pág. 49
Figura 46: Relación entra la potencia en el freno de buque convencional y buque con cascada de alas, en función del ángulo del viento verdadero	Pág. 50
Figura 47: Ruta Ortodrómica y Ruta óptima	Pág. 51
Figura 48: Variación estacional de la energía media diaria en el Mar del Norte	Pág. 52
Figura 49: Buque Solar Albatros y Solar Wing con velas solares	Pág. 53
Figura 50: Buque Aquatanker III con velas solares	Pág. 53
Figura 51: Buque CargoXpress con vela estructural solar	Pág. 54
Figura 52: Disposiciones de los estabilizadores tipo aleta	Pág. 56
Figura 53: Transformación velero tipo goleta en buque birotor	Pág. 59
Figura 54: Buque birotor BUCKAU	Pág. 59
Figura 55: Buque “Bárbara” con tres rotores Flettner	Pág. 60
Figura 56: Vista interior del Turbosail	Pág. 61
Figura 57: Buque “Moulin a Vent”	Pág. 62
Figura 58: Buque Alcyone	Pág. 62
Figura 59: Influencia de la succión en la eficiencia aerodinámica del Turbosail	Pág. 63

Figura 60: Superposición de los componentes de la velocidad en el rotor	Pág. 64
Figura 61: Coeficientes aerodinámicos de rotores en función de la relación de rotación	Pág. 66
Figura 62: Rotores THOM con discos	Pág. 66
Figura 63: Eficiencia aerodinámica de rotor y de velas tipo goleta	Pág. 67
Figura 64: Eficiencia aerodinámica de diversos tipos de rotores	Pág. 67
Figura 65: Buque E-Ship 1 con 4 rotores Flettner	Pág. 68
Figura 66: Rango y rendimiento de los rotores propuestos	Pág. 69
Figura 67: Proyecciones ortogonales del buque propuesto con 4 rotores abatibles	Pág. 71
Figura 68: Empuje y rendimiento de 4 rotores Flettner	Pág. 71
Figura 69: Representación de las propuestas de Greenwave con 3 y 4 rotores	Pág. 72
Figura 70: Diseño conceptual rotores Flettner por Wartsila	Pág. 73
Figura 71: Fuerza directiva media $F_{xav}/A_s$ en función de la velocidad media del viento	Pág. 74
Figura 72: Plano de una cometa	Pág. 75
Figura 73: Posibles rumbos para la propulsión mediante cometas	Pág. 76
Figura 74: Sistema SkySails a bordo del Beluga Skysails	Pág. 78
Figura 75: Descomposición de la fuerza aerodinámica sobre una cometa	Pág. 79
Figura 76: Fuerzas sobre una cometa en vuelo	Pág. 80
Figura 77: Envoltura de vuelo de una cometa	Pág. 81
Figura 78: Ángulo de ataque de una cometa	Pág. 82
Figura 79: Momento escorante debido al remolque con una cometa	Pág. 83
Figura 80: Las fuerzas sobre el buque con cometa para un viento de 30º por popa	Pág. 84
Figura 81: Energía del viento	Pág. 84
Figura 82: Posible evolución de la cometa sobre la envoltura de vuelo	Pág. 85
Figura 83: Fuerza de la cometa en función de la altura de vuelo	Pág. 86
Figura 84: Diagrama polar del ahorro relativo de combustible para cometa de $500m^2$	Pág. 88
Figura 85: Diagrama del propulsor en aguas abiertas	Pág. 88
Figura 86: Planta y perfil del sistema SkySails montado a bordo	Pág. 90

Figura 87: Beluga SkySails	Pág. 91
Figura 88: Energía del viento.	Pág. 93
Figura 89: Unidad de gobierno de la cometa	Pág. 94
Figura 90: Fases del vuelo	Pág. 94
Figura 91: Energía generada por una cometa KitVes.	Pág. 95
Figura 92: Ilustración de una turbina eólica Vestas V39/600 a bordo de un buque tanque para generación eléctrica.	Pág. 98
Figura 93: Rotor Savonius	Pág.100
Figura 94: Rotor Darrieus	Pág.101
Figura 95: Rotor Darrieus H	Pág.101
Figura 96: Rotor Helicoidal	Pág.101
Figura 97: Fuerzas y velocidades que actúan sobre una turbina de eje vertical	Pág.102
Figura 98: Buque Stena Jutlandica con dos aerogeneradores de eje vertical en la proa	Pág.104
Figura 99: Curva de potencia de las turbinas eólicas de eje vertical UGE-4K	Pág.105
Figura 100: NYK Line's car carrier "Andromeda Leader"	Pág.106
Figura 101: Hydrogen Challenger	Pág.106
Figura 102: Mapa de los puntos analizados en el estudio de los vientos.	Pág.107
Figura 103: Mapa de dirección e intensidad del viento del 1 al 15 de Enero	Pág.109
Figura 104: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 1 en Enero	Pág.110
Figura 105: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 2 en Enero	Pág.112
Figura 106: Mapa de dirección e intensidad del viento del 1 al 15 de Abril.	Pág.113
Figura 107: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 1 en Abril	Pág.114
Figura 108: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 2 en Abril.	Pág.115
Figura 109: Mapa de dirección e intensidad del viento del 1 al 15 de Julio.	Pág.116
Figura 110: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 1 en Julio.	Pág.117
Figura 111: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 2 en Julio.	Pág.118
Figura 112: Mapa de dirección e intensidad del viento del 1 al 15 de Octubre	Pág.119
Figura 113: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 1 en Octubre.	Pág.120

Figura 114: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 2 en Octubre.	Pág.121
Figura 115: Programa de ruta meteorológica SeaPlanner.	Pág.124
Figura 116: Histograma de la ruta meteorológica.	Pág.125
Figura 117: Comparativa de ahorros en vientos de fuerza 4 Beauford.	Pág.126
Figura 118: Comparativa de ahorros en vientos de fuerza 5 Beauford.	Pág.127
Figura 119: Comparativa de ahorros en vientos de fuerza 6 Beauford.	Pág.128
Figura 120: Buque Spirit.	Pág.135
Figura 121: Buque WindStar	Pág.136
Figura 122: Buque WindSurf	Pág.137
Figura 123: Historial de la velocidad del viento verdadero.	Pág.141
Figura 124: Historial del ángulo del viento verdadero.	Pág.141
Figura 125: Historial de la velocidad del buque.	Pág.141
Figura 126: Historial de la potencia de la máquina	Pág.141
Figura 127: Buque CargoXpress con vela estructural solar.	Pág.143
Figura 128: Escenario energético de buque tradicional tipo feeder .	Pág.144
Figura 129: Escenario energético con buque CargoXpress.	Pág.144
Figura 130: Perfil del buque CargoXpress.	Pág.145
Figura 131: Velas rígidas propuestas por Wärtsila.	Pág.146
Figura 132: Proyecciones ortogonales del buque propuesto con 3 rotores	Pág.147
Figura 133: Empuje y rendimiento de 3 rotores	Pág.147
Figura 134: Proyecciones ortogonales del buque propuesto con 5 rotores	Pág.148
Figura 135: Empuje y rendimiento de 5 rotores	Pág.148
Figura 136: Proyecciones ortogonales del buque propuesto con 6 rotores	Pág.149
Figura 137: Empuje y rendimiento de 6 rotores	Pág.149

## 1.- Introducción

Durante más de 5000 años, la navegación oceánica ha hecho uso de la energía del viento para propulsar los buques por todo el mundo. Tan sólo hace 100 años que ha aparecido la tecnología adecuada para obtener energía a partir de los combustibles fósiles, y a consecuencia de los bajos precios de estos, la propulsión eólica se ha visto totalmente desbancada del transporte marítimo.

Se estima que el transporte marítimo ha emitido 1.046 millones de toneladas de  $CO_2$  en el año 2007, lo que corresponde al 3,3% de las emisiones globales durante ese mismo año. Estas emisiones pueden considerarse que no son nada elevadas si consideramos alrededor del 85% de los bienes comercializados internacionalmente son transportados por esta vía. Aunque este es un medio de transporte relativamente eficiente, el tamaño del sector genera grandes cantidades de gases de efecto invernadero.<sup>1</sup>

Además, se ha predicho<sup>2</sup> que para el año 2050, si se continúa sin establecer políticas de limitación, las emisiones del transporte marítimo incrementarán entre el 150% y 250%, lo que está presionando a los nuevos diseños de los buques para ser más sostenibles ambientalmente. Mientras que las regulaciones existen para ciertas emisiones, no hay mucha legislación para las emisiones de dióxido de carbono  $CO_2$ . No obstante la introducción de medidas de rendimiento, como el Índice de Diseño de Eficiencia Energética<sup>3</sup> propuesto por la Organización Marítima Internacional, proporcionan una forma para empezar a crear diseños desde un punto de vista ambiental.

Existen diversos factores que muestran una clara tendencia hacia la reducción del consumo de derivados del crudo, que hace reflexionar sobre cuál será la tecnología que permitirá dejar de depender tanto del suministro de energía de los combustibles no renovables.

Las fluctuaciones imprevisibles en el precio del crudo, que impulsadas por tensiones políticas, económicas o guerras hacen dudar de la viabilidad del negocio marítimo si los precios llegasen a doblarse o triplicarse en un futuro no muy lejano. Por tanto, puede el viento como fuente de energía que dejó de tenerse en cuenta por causa del bajo precio del combustible, vuelva a ser necesario a la hora de sobrellevar el aumento de los precios de los combustibles fósiles.

Por estas razones he considerado interesante estudiar una serie de soluciones técnicas alternativas a la vela tradicional, que están disponibles para la propulsión mediante el viento. Estos diseños fueron aplicados años atrás, y han sido olvidados en el pasado como inventos fallidos, debido a que no eran rentables por causa del bajo precio del petróleo en esas épocas. Hoy en día, ha avanzado mucho la tecnología desde entonces y considero que merece la pena investigar.

---

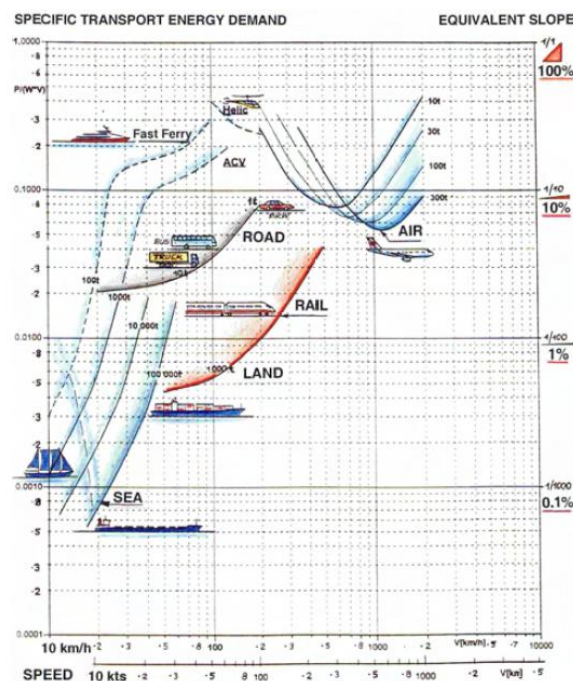
<sup>1</sup> Second IMO GHG Study 2009 Update of the 2000 GHG. Buhaug, Ø., et al.,

<sup>2</sup> Second IMO GHG Study 2009 Update of the 2000 GHG. Buhaug, Ø., et al.

<sup>3</sup> EEDI

Desde entonces, se ha avanzado muchísimo en sistemas de control automático, tecnología de la información, tecnología de materiales y tecnología de predicción meteorológica, entre otras muchas ramas que aportan nuevas facilidades a la hora de aprovechar estas antiguas tecnologías. Así que se hizo interesante estudiar en que parte de su evolución se encuentran estas tecnologías, y cuáles serían las aplicaciones actuales de estos sistemas, además de poder cuantificar cual es el rendimiento que podríamos esperar de cada uno de ellos y si realmente podían ser tomadas en cuenta a la hora de solventar problemas como la contaminación atmosférica, la futura escasez de crudo o la incipiente conciencia renovable de los nuevos tiempos.

El Transporte Marítimo en términos energéticos y a velocidades moderadas es potencialmente el modo de transporte de mercancías más eficiente que existe, siendo unas diez veces más eficiente que el transporte por carretera o por ferrocarriles y 100 veces más que el transporte aéreo.



**Figura 1: Demanda específica de energía de los diversos modos de transporte.<sup>4</sup>**

El transporte por mar tiene la mayor parte del volumen global transportado, pero solo un pequeño porcentaje del consumo global de combustibles. Pero la cuestión del fuel marino es más bien la calidad que la cantidad, ya que es de peor calidad que los demás combustibles, debido a su bajo nivel de refinamiento, por lo que contamina más que los empleados en otros medios de transporte.

Si el transporte con cero emisiones es una posibilidad real, entonces el transporte marítimo debería ser el primer candidato para cubrir su baja demanda de energía mediante un alto porcentaje o completamente de fuentes de energía renovables de baja densidad.

<sup>4</sup> Fuente: "Wind Propulsion for Solar Ship Operation". Peter Schenzle. Hamburg. Germany. June 2006.

Esto es válido para el transporte de mercancías a velocidades razonables. Nuestra presente tendencia a alcanzar cada vez mayores velocidades en el mar, y cada vez buques más rápidos, puede fácilmente abastecerse y aprovechar la energía específica debida al viento, pero solo bajo un 10% de las velocidades del viento.

## 2.- Evolución del precio del petróleo.

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos compuestos, los cuales están formados por carbono e hidrógeno. Es extraído de los lechos geológicos tanto de la plataforma continental y como en plataformas offshore en alta mar, y a través de su destilación y refinamiento se obtienen productos como el gasóleo, el fuel-oil, la gasolina, el queroseno, la nafta y otros muchos derivados del mismo.

Actualmente el petróleo es la fuente más importante para la producción energética en todo el mundo. Prácticamente, casi todos los procesos productivos, al igual que la producción de energía eléctrica, como el transporte mundial, dependen del petróleo. Esto es debido principalmente, al leve coste de su extracción, almacenamiento y transporte hasta los lugares donde es vendido, además de su abundancia en la actualidad. Aunque hay que mencionar que el petróleo es un recurso no renovable, al igual que los minerales, ya que existe una cantidad límite, en cuanto a su extracción. Algún día, aunque lejano, este recurso se va a agotar. Por lo que no es un recurso infinito con el que podremos contar eternamente.

A lo largo de los tiempos, los precios del crudo han fluctuado mucho. Cualquier investigación histórica sobre los precios del crudo revela interesantes tendencias y señales de comercio.

En el año 1950 el barril de crudo tan sólo costaba 2,49 dólares, y se mantuvo durante una década, para llegar a alcanzar únicamente los 3,18 dólares en 1970.



Figura 2: Evolución de los precios del barril Brent en dólares.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Fuente: <http://perseo.sabuco.com/historia/industria.htm>

A comienzos de la década de los años sesenta, trece de los principales países exportadores de crudo se enfrentaron con las petroleras internacionales por los precios del petróleo. Estas discusiones llevaron a los estados productores a crear la Organización de Países Exportadores de Petróleo<sup>6</sup>, con la intención de influir sobre los precios del crudo mediante el control de los niveles de producción. Su actividad durante la primera década fue limitada y su influencia mínima. No fue hasta a principios de los años setenta, cuando a raíz del importante crecimiento de la demanda en los principales países industrializados la OPEP consolidó su influencia. De esta manera, los países de la OPEP logran generar mayores ingresos en sus presupuestos, ya que cuando comenzó el proceso de nacionalización del crudo, el precio del crudo subió por la debilidad del dólar.

En octubre de 1973, como consecuencia de la guerra del Yon Kippur que fue un enfrentamiento armado a gran escala entre Israel y los países árabes de Egipto y Siria dentro del denominado conflicto árabe-israelí, los países árabes exportadores de petróleo declararon un embargo del petróleo que desencadenó una espectacular subida de su precio, que llegó a triplicarse en tan sólo seis meses.

En enero de 1976 entró en vigencia la Ley de Nacionalización de la Industria Petrolera con la que Venezuela se propuso nacionalizar el petróleo.

En 1979 se destronó al último Sha de Persia, dejando el poder al ayatollah Jomeini quien proclamó la revolución islámica, lo que supuso un incremento de hasta los 21,59 \$ por barril en 1980. Tan sólo un año después, Irak invadió Kuwait y el precio volvió a ascender hasta los 40 dólares, aunque esta situación tan solo duro un año y dio paso a otro periodo de casi una década, durante la cual los precios siguieron oscilando entre los 10 y los 25 dólares.

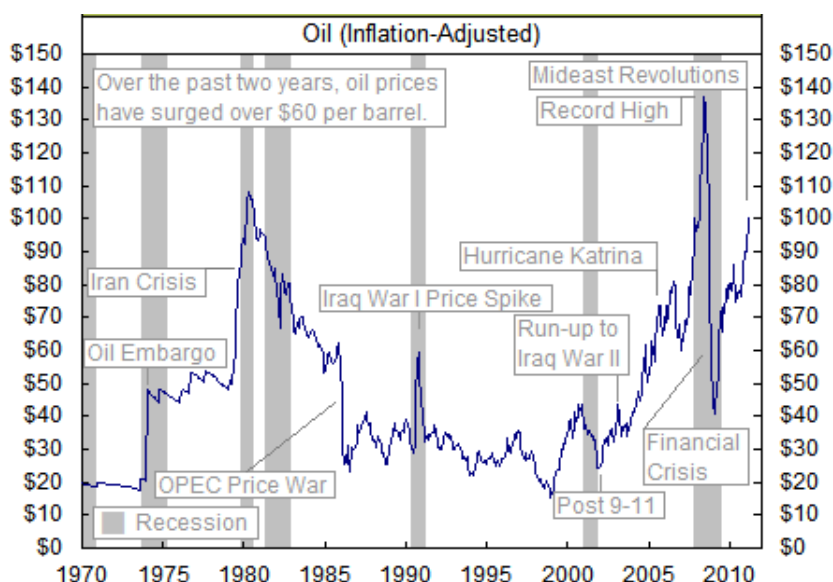


Figura 3: Precios del crudo ajustados a la inflación.<sup>7</sup>

<sup>6</sup> OPEP

<sup>7</sup> Fuente: [www.chartoftheday.com](http://www.chartoftheday.com)  
Proyecto Final de Carrera



La figura 3, ofrece una perspectiva sobre la decadencia histórica y reciente alza con una visión a largo plazo de la inflación ajustada por crudo West Texas Intermediate. Además pone de manifiesto que la mayoría de las alzas de los precios del petróleo eran resultado de la crisis del Oriente Medio y, a menudo precedió o coincidió con una recesión en EE.UU.

Al comenzar la Crisis asiática en 1999, el precio del barril incremento en 20 dólares, manteniéndose en ese nivel hasta el atentado del 11-S, a partir del cual, bajo levemente durante medio año.

A partir del año 2004, una vez pasada la Segunda Guerra del Golfo, y durante la Guerra de los Yukos, el precio volvió a batir record en su precio, alcanzando el valor de casi 50 dólares por barril.

La última vez que subieron los precios del crudo hasta el nivel de 140 dólares por barril Brent fue el año 2008, justo cuando el mercado de valores continuó su tendencia descendente durante varios meses después, alcanzando sus mínimos en marzo de 2009 haciendo historia ya que redujo más de 90 dólares por barril en tan sólo ocho meses.



**Figura 4: Evolución del precio del barril de Brent en Londres.**<sup>8</sup>

Durante todo el 2009, el precio fue aumentando hasta alcanzar los 74,40 dólares por barril, dando paso así al año 2010 en el que siguió incrementando progresivamente desde los 76,42 hasta los 92,29 dólares por barril. En enero del 2011 el precio era de 97,4 dólares por barril y alcanzó un valor máximo de 124 dólares en abril, volviendo a descender hasta los 108,66 dólares en diciembre el mismo año.<sup>9</sup>

También es interesante notar que el reciente repunte en los precios del petróleo ha llevado el precio del petróleo a un nivel históricamente alto, hasta un nivel que sólo fue superado brevemente durante la parte final de las alzas de precios más importantes de 1980 y 2008.

El año 2012 amaneció con el precio del crudo montado en la cima de los 100 dólares el barril, no ha descendido de ese nivel en este primer trimestre, y si sigue manteniéndose la tensión con Irán, el precio del barril Brent podría llegar a aumentar proporcionalmente, según prevé la Société Générale.

<sup>8</sup> Fuente: <http://www.finanzas.com/wp-content/uploads/precio-petroleo.jpg>

<sup>9</sup> <http://www.datosmacro.com/materias-primas/brent?anio=2009>

Actualmente Irán amenaza con cerrar el estrecho de Ormuz, para contrarrestar las sanciones de Occidente. Se estima que el 40% del petróleo mundial pasa por las aguas del estrecho de Ormuz, por lo que su cierre supondría un considerable aumento de precio del crudo.



**Figura 5: Posible variación del precio del crudo por la tensión de Irán.**<sup>10</sup>

Según la Société Générale existen diversos escenarios en los que podría verse afectado el precio del crudo los próximos años. En el primer escenario considera que Irán intenta cerrar el estrecho de Ormuz, lo que provocaría un enfrentamiento militar con EEUU y sus aliados, lo que podría aumentar el precio del crudo hasta los 200 dólares por barril. Y el segundo escenario previsto, consideran que Irán se limite a mantener la amenaza de cortar el estrecho de Ormuz, pero sin ejecutarlo, lo que supondría más tensión, pero sin conflicto militar, por lo que podría aumentar el precio del crudo hasta los 150 dólares por barril.

A partir de esta evolución histórica de la cotización del crudo, podemos observar la influencia directa de las tensiones políticas internacionales sobre el precio del mismo, por lo que se demuestra la gran variabilidad del precio de los escasos recursos no renovables de los que tanto dependemos.

Esta puede ser una de las razones por las que los armadores pueden llegar a volver considerar fuentes de energía alternativas para propulsar sus buques, de forma que no dependan tanto de la tensión internacional entre los países productores de crudo.

Si se alcanzase un elevado precio del mismo, podrían volverse rentables muchas soluciones tecnológicas alternativas para la propulsión marítima que fueron abandonadas en el pasado.

<sup>10</sup> Fuente: David Page. "¿Viene otra gran recesión? Europa se la juega en Irán. Revista Expansión. 25 Enero 2012. <http://www.expansion.com/2012/01/25/economia/1327494953.html>

### 3.- Normativa relativa a la contaminación atmosférica.

Las normas que regulan las emisiones a la atmosfera de gases generados por los buques se han convertido en los últimos años en materia de atención permanente para el sector marítimo. En algunos casos, estas normas están ya vigentes y tienen repercusiones sobre los costes de explotación de los buques, y en ese sentido son ya preocupación diaria de las empresas navieras. En otros aspectos, los armadores probablemente no son aun totalmente conscientes de lo que se avecina.

Las emisiones de gases perjudiciales que generan los buques se pueden clasificar en dos grupos: los gases contaminantes y los gases de efecto invernadero.

Los *gases contaminantes* están constituidos principalmente por óxidos de azufre ( $SO_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y partículas sólidas en suspensión en el aire (PM), y sus efectos perjudiciales tienen lugar a distancias relativamente cortas pudiendo ser de dos tipos:

- Generación de lluvias ácidas que perjudican el medio ambiente, especialmente cuando se depositan en suelos de naturaleza ácida (granítica), como ocurre en el norte de Europa.
- Efectos nocivos sobre la salud humana por las PM, al que se atribuye el fallecimiento prematuro de personas que padecen enfermedades respiratorias en las zonas de elevadas emisiones de PM.

Tanto las emisiones de  $SO_x$  como las de PM van asociadas al contenido de azufre en el combustible. Por eso, la forma de reducirlas es, en principio, reducir dicho contenido, extrayendo el azufre del combustible. Ello se traduce en un considerable aumento del precio del combustible en el mercado, en comparación con el combustible ordinario. Alternativamente sería posible eliminar el  $SO_x$  y las PM de los gases de escape de la maquinaria, mediante depuradores<sup>11</sup>, cuya eficacia está hoy día contrastada, aunque, su coste también es muy elevado, y debido a su gran peso y volumen no son en general apropiados para buques existentes.

Aunque el azufre está presente en escasa cantidad en el petróleo y el carbón en su estado natural, ya hace décadas que se señala al dióxido de azufre ( $SO_2$ ) como responsable en buena medida de las «lluvias ácidas» y de la contaminación del aire que afectan a las zonas urbanas e industriales. Más recientemente, se ha reconocido asimismo que las emisiones de  $SO_2$  contribuyen a la formación de gases aerosoles inorgánicos secundarios, partículas finas que son perjudiciales para la salud humana.

---

<sup>11</sup> Scrubbers

Los *gases de efecto invernadero*, están constituidos principalmente por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), además de otros de menor importancia. Y sus efectos nocivos no tienen lugar a corta distancia<sup>12</sup>, sino que tienen un efecto acumulativo en las capas altas de la atmósfera, donde se atribuye al  $\text{CO}_2$ , el aumento del efecto invernadero y el consiguiente cambio climático. No existen aún tecnologías comprobadas para la captura del  $\text{CO}_2$  de los gases de escape de los buques.

El efecto de calentamiento de la atmósfera, se define cómo el fenómeno natural que permite la absorción de parte de la radiación de onda larga que la superficie terrestre emite y que de otra forma se perdería en el espacio. Esto sucede debido a la existencia de ciertos gases en la atmósfera que son capaces de absorber esa parte de las radiaciones y con ello mantener una temperatura superior en el planeta, de la que habría en su ausencia. El aumento de la concentración de algunos de estos gases como el dióxido de carbono, que provienen del uso de combustibles fósiles, puede ser un factor que haya intensificado este fenómeno, y como consecuencia contribuido a un ascenso de la temperatura global. Se prevé que la temperatura de la Tierra subirá entre 1,8º C y 4º C este siglo, y el nivel del mar entre 18cm y 59 cm.<sup>13</sup>

Como no todos los gases de efecto invernadero tienen la misma capacidad de absorción de las radiaciones, en la siguiente tabla se indica la relación entre ellos. Un gramo de CFC produce un efecto invernadero 15.000 veces mayor que un gramo de  $\text{CO}_2$ , pero como la cantidad de  $\text{CO}_2$  es mucho mayor que el resto de los gases, la contribución real al efecto invernadero es la que señala la columna de la derecha. Otros gases como el oxígeno y el nitrógeno, aunque se encuentran en proporciones mucho mayores, no son capaces de generar efecto invernadero.

<b>Tabla 1: Capacidad de absorción de las radiaciones de los GEI.<sup>14</sup></b>		
	Acción Relativa	Contribución real
$\text{CO}_2$	1 (referencia)	76%
CFCs	15.000	5%
$\text{CH}_4$	25	13%
$\text{N}_2\text{O}$	230	6%

<sup>12</sup> No se les considera contaminantes.

<sup>13</sup> Conclusión del cuarto informe realizado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC). <http://www.ipcc.ch/>.

<sup>14</sup> "Impacto Medioambiental del Sector Marítimo: Emisiones atmosféricas". Grupo de Trabajo de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible del COIN y la AINE.

### 3.1.- Los Gases Contaminantes

#### 3.1.1.- Normativa Internacional relativa a gases contaminantes

Las actuales acciones regulatorias buscan reducir las emisiones de los buques, forzando la introducción de nuevas tecnologías de reducción y estableciendo unos requisitos mínimos en los estándares de calidad de los combustibles.

La Organización Marítima Internacional<sup>15</sup> es la agencia especializada de las Naciones Unidas con la responsabilidad para la seguridad y protección del transporte marítimo y la prevención de la contaminación marina por buques, convirtiéndose así en el principal cuerpo regulatorio que podemos encontrarnos.

La Convención Internacional para la Prevención de la Contaminación de Buques, MARPOL 1973/1978, es el principal convenio de la OMI que apunta hacia prevenir y minimizar la contaminación desde buques, tanto accidentales como las causadas en operaciones rutinarias. Actualmente dispone de seis anexos técnicos.

Las emisiones de los buques están reguladas por el Anexo VI que entró en vigor el 19 de mayo de 2005, estableciendo unas *“Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”*. Este fue creado para reducir la contribución del transporte marítimo a la contaminación atmosférica, incluyendo valores límite para las emisiones de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, y prohibiendo también la emisión deliberada de sustancias destructivas de la capa de ozono.

Los estándares de emisiones de la OMI son conocidos como los estándares Tier I-II-III. Los estándares Tier I fueron establecidos en 1997 cuando la contaminación atmosférica fue introducida al anexo VI, mientras que los estándares Tier II-III que establecen nuevos requerimientos de calidad del fuel, fueron introducidos en 2008 cuando el Anexo VI fue enmendado por el Comité de Protección del Medio Marino, introduciendo áreas de control de emisiones<sup>16</sup>, en las que debido a sus problemas de calidad del aire, se les aplicaron políticas más estrictas sobre emisiones desde el 1 de Julio de 2010.

Como consecuencia del largo periodo que tardó en entrar en vigor, cuando finalmente fueron aplicables las normas del Anexo VI, muchos países consideraban ya desfasadas las normas del mismo. Por este motivo, en octubre de 2008 el Comité de Protección del Medio Marino enmendó el Anexo VI estableciendo un calendario para el endurecimiento progresivo y muy importante de sus exigencias, los estándares Tier II-III.

---

<sup>15</sup> IMO. International Maritime Organization.

<sup>16</sup> Emission Control Areas. ECAs

Las Zonas de Control de Emisiones son aquellas que por tener entornos ácidos o elevados niveles de población costera, y elevados niveles de tráfico marítimo se consideran especialmente sensibles. Una ECA puede ser designada para los tres tipos de emisiones desde buques SOx, para PM, o NOx. Las ECAs en las que se limita las emisiones de SOx, se denominan SECAs<sup>17</sup>.

El Anexo VI del convenio MARPOL 73/78 parte del principio de no pretender una reducción extrema de sus emisiones en todo el globo, sino que establece dos niveles de reducción:

- Actualmente están declaradas como ECAs; el mar Báltico para emisiones de SOx desde mayo del 2006, el mar del Norte y el Canal de la Mancha para emisiones de SOx desde noviembre de 2007 y las costas de Norteamérica, hasta las 200 millas para las emisiones de NOx y SOx desde agosto de 2011.



**Figura 6: Mapa de las Zonas de Control de Emisiones. ECAs<sup>18</sup>**

- En el resto del mundo, la regulación es algo menos exigente.

En general se estableció que para el mes de Enero del año 2012, se redujera el contenido máximo de azufre en los combustibles pesados marinos, del 4,5% al 3,5%, y posteriormente al 0,5% con fecha de efecto en el mes de enero del año 2020. Esto último sujeto a una revisión durante el año 2018.

El límite en el contenido de azufre en las SECA's se debería de reducir el 1 de Julio del año 2010, del 1,5% al 1%, siendo posteriormente reducido al 0,10% en el mes de enero del año 2015.

También se aprobaron posteriores reducciones en las emisiones de NOx, estipulando los requisitos conocidos como Tier III, para los motores de todos los buques construidos a partir del 1 de enero del año 2016, que operen en las SECA's

<sup>17</sup> Sulfur Emission Control Area.

<sup>18</sup> Fuente: [http://blogs.dnv.com/lng/wp-content/uploads/2011/02/1101-052-Kart-s7\\_v2.png](http://blogs.dnv.com/lng/wp-content/uploads/2011/02/1101-052-Kart-s7_v2.png)

También se permitirá el establecimiento de nuevas ECA's para el control de las emisiones de óxidos de azufre, de nitrógeno y PM, en todos aquellos casos en los que se demuestre su efecto beneficioso en cuanto a prevención, reducción y control; de estos contaminantes, y a propuesta de cualquier parte del convenio. Todas estas enmiendas entraron en vigor por el procedimiento de aceptación tácita, el 1 de julio del año 2010.

### 3.1.2.- Normativa Europea relativa a gases contaminantes.

La *Directiva 1999/32/CE* amplía la legislación sobre la reducción de emisiones de dióxido de azufre a determinados combustibles líquidos derivados del petróleo utilizados por los buques de navegación marítima, regulando el contenido de azufre de los combustibles. Esta Directiva se aplica a los gasóleos marinos, pero sin embargo no es aplicable al tipo de combustible marino más utilizado, el fuel oil intermedio y pesado o IFO y HFO47, de paso, establece que la Comisión deberá considerar qué medidas deben ser llevadas a cabo para reducir la contribución a la acidificación de la combustión de los combustibles marinos distintos de los destilados.

Ante el retraso de la entrada en vigor del Anexo VI de MARPOL, la UE decidió modificar la *Directiva 1999/32*, que regula el contenido de azufre en los combustibles marinos, adoptando para ello la *directiva 2005/33/CE*.

La *Directiva 2005/33/CE*, forma parte de una estrategia de la Unión Europea destinada a reducir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques que, en la actualidad, constituyen una de las fuentes principales de emisiones de dióxido de azufre ( $SO_2$ ) en la unión. Los estudios realizados pusieron de manifiesto que, en 2010, esas emisiones podrían representar más del 75 % del conjunto de emisiones de origen terrestre. La Directiva amplía el ámbito de aplicación de la *Directiva 1999/32/CE* a todos los combustibles líquidos derivados del petróleo utilizados en los buques que operan en aguas de los Estados miembros. La Directiva prevé en particular:

- Limitar al 1,5 % el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo utilizados por los buques en el Mar Báltico, a partir del 11 de agosto de 2006, y en el Mar del Norte y el Canal de la Mancha, a partir del 11 de agosto de 2007, con objeto de reducir la acidificación y mejorar la calidad del aire;
- Limitar al 1,5 %, a partir del 11 de agosto de 2006, el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo utilizados por los buques de transporte de pasajeros con servicios regulares hacia y desde puertos de la Unión a fin de mejorar la calidad del aire y crear suficiente demanda para garantizar el suministro de combustible de bajo contenido de azufre en toda la Unión;
- Limitar al 0,1 %, a partir del 1 de enero de 2010, el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo utilizados por los buques de navegación interior y buques atracados a fin de mejorar la calidad del aire en los puertos y vías interiores;
- Limitar al 1,5 % el contenido de azufre de los combustibles diésel para uso marítimo vendidos en la Unión;



- Limitar al 0,1 % el contenido de azufre de los gasóleos para uso marítimo vendidos en la Unión;
- Exigir que los diarios de navegación indiquen las operaciones de cambio de combustible, como condición para la entrada de los buques en puertos comunitarios;
- Garantizar que el proveedor indique el contenido de azufre de los combustibles vendidos en el territorio de los Estados miembros y adjunte una muestra.

La Directiva establece además que los combustibles para uso marítimo sean objeto de un muestreo y de una comprobación de su contenido de azufre. Cada año, los Estados miembros transmitirán a la Comisión un informe sobre el contenido de azufre de los combustibles contemplados en la Directiva y utilizados en su territorio.

Estas modificaciones fueron muy criticadas en su momento por el sector naviero, tanto europeo como internacional, porque incluían dos elementos que iban más allá de las exigencias del Anexo VI de MARPOL, en particular estos dos límites máximos del contenido en azufre:

- El 1,5% para los buques de pasaje que presten servicios regulares con puertos de la UE en navegación por las aguas territoriales y zona económica exclusiva de Estados de la UE.
- El 0,1% para todos los buques durante su estancia en puerto. (Desde 1 de enero de 2010).

### **3.2.- Gases de efecto invernadero.**

#### **3.2.1.- El Protocolo de Kyoto (1997).**

Ante la evidencia cada vez más aceptada de la influencia humana en el cambio climático, el Panel Internacional para el Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas promovió el Convenio-Marco el Cambio Climático en 1992, entrando en vigor en 1994.

Posteriormente se adoptó el Protocolo de Kyoto que actualiza y amplía dicho tratado. El Protocolo de Kyoto se firmó en 1997 y ha entrado en vigor en 2005. De todos los países industrializados, solamente EE.UU. y Australia faltan por ratificarlo, aunque ambos firmaron en su día el tratado.

Este Protocolo apenas hace una mención al transporte marítimo, que queda excluido de los objetivos generales de reducción de emisiones, por lo que no hay por tanto cuotas obligatorias de reducción de emisiones para el transporte marítimo, pero la OMI deberá desarrollar normas al respecto a medio plazo.



### 3.2.2.- Normativa Internacional.

En noviembre del año 2003, la Organización Marítima Internacional adoptó una resolución relacionada con el control de las emisiones de gases de efecto invernadero, en la que urgía al Comité de Protección del Medio Marino a identificar y desarrollar los mecanismos necesarios para lograr la limitación o reducción de emisiones de GEI del transporte marítimo internacional.<sup>19</sup>

El 15 de Julio de 2011 el Comité de Protección del Medio Marino<sup>20</sup> de la OMI en su 62ª sesión, añadió un nuevo capítulo 4 al Anexo VI del Convenio MARPOL<sup>21</sup>, sobre *Regulaciones en eficiencia energética para buques*. La resolución<sup>22</sup> establece medidas obligatorias para aumentar la eficiencia energética y reducir la emisión de gases de efecto invernadero, en particular emisiones de CO<sub>2</sub>, representando así el primer régimen global obligatorio de reducción de CO<sub>2</sub> para un sector de la industria internacional.

Este capítulo fue creado con el fin de hacer obligatorio un Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI)<sup>23</sup> para buques nuevos, y un Plan de Manejo de Eficiencia Energética del Buque (SEEMP)<sup>24</sup> para todos los buques y está previsto que entre en vigor internacionalmente, el 1 de enero del 2013.

El SEEMP, establece un mecanismo para que los operadores aumenten la eficiencia energética de los barcos, al gestionar de una mejor forma la velocidad a lo largo del viaje.

Por su parte, la Organización Marítima Internacional y la Organización de Aviación Civil Internacional<sup>25</sup> piden que todos los Estados sean tratados de la misma manera de acuerdo al principio de trato equitativo. Como resultado de ello, algunos países, como China, pidieron en la reunión de octubre de 2010 que el EEDI fuera obligatorio sólo para los países desarrollados y voluntario para los países en desarrollo.

Durante la reunión de julio de 2011, Brasil, China, Arabia Saudita y Sudáfrica pudieron conseguir un período de seis años y medio para implementar estas regulaciones en aquellas embarcaciones registradas en países en desarrollo. De esa forma, los países en desarrollo podrían tener el tiempo necesario para adquirir las tecnologías necesarias para cumplir con lo solicitado.

Asimismo, el nuevo capítulo incluye un reglamento sobre asistencia técnica y transferencia de tecnología, especialmente para beneficio de los países en desarrollo, que se relaciona con la mejora de la eficiencia energética en los barcos.

---

<sup>19</sup> Resolución A.963(23) IMO *Polices and practices relate to the reduction of greenhouse gas emissions from ships*.

<sup>20</sup> MEPC

<sup>21</sup> Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques

<sup>22</sup> MEPC.203 (62)

<sup>23</sup> Energy Efficiency Design Index

<sup>24</sup> Ship Energy Efficiency Management Plan

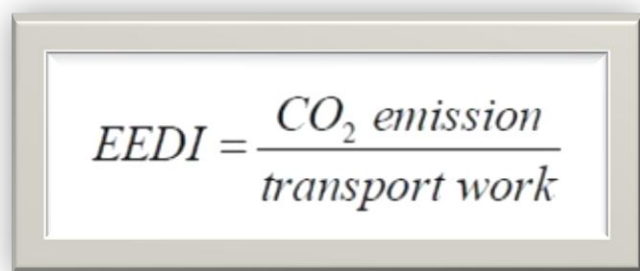
<sup>25</sup> OACI

Las regulaciones sobre el Índice de Diseño de Eficiencia Energética son unas medidas que requieren un nivel mínimo de eficiencia energética en los buques nuevos, simulando continuamente desarrollos técnicos para todos los componentes que influyen en la eficiencia de combustible de un buque. También está siendo empleado para permitir una comparación sobre la eficiencia energética de buques del mismo tamaño para hacer un mismo transporte.

El trabajo de transporte es calculado multiplicando la capacidad del buque<sup>26</sup>, por la velocidad de diseño del buque medida en la condición de máxima carga de diseño al 75% de la máquina propulsora instalada.

Este mecanismo no-prescriptivo permite la elección de las tecnologías a utilizar, para un diseño de buques con menor carga ambiental. Mientras se logre el nivel requerido de eficiencia energética, los diseñadores y constructores de buques tienen la libertad de utilizar las soluciones más rentables para que el buque cumpla con las regulaciones.

Pudiendo considerarse la siguiente formula EEDI simplificada:


$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ emission}}{\text{transport work}} \quad [1]$$

En esta fórmula, "*CO<sub>2</sub> emission*" representa el total de las emisiones procedentes de la combustión de combustibles, incluyendo máquinas propulsoras, auxiliares y calderas, teniendo en cuenta el contenido en carbono de los combustibles en cuestión. Si se incorporan a bordo de un buque tecnologías mecánicas o eléctricas eficientes energéticamente, sus efectos son reducidos de las emisiones totales de dióxido de carbono. La energía ahorrada por el uso de energías de baja densidad como la energía solar o la del viento, también es reducida de las emisiones totales de *CO<sub>2</sub>*.

El Índice de Diseño de Eficiencia Energética calculado para buques nuevos, será exigible a buques petroleros, graneleros, combinados, portacontenedores, gaseros, buques de carga general y cargueros frigoríficos, de arqueo bruto igual o superior a 400 GT, cuyo contrato de construcción se firme a partir del 1 de enero de 2013, o bien se entreguen a partir del 1 de julio de 2015. Para los tipos de buques no cubiertos por la formula EEDI, se desarrollaran en el futuro unas satisfactorias para el caso, de acuerdo con un plan de trabajo aprobado en la reunión MEPC 62. Este requerimiento no será exigible para los buques que se dediquen exclusivamente al tráfico de cabotaje en su Estado de bandera, ni a los que utilicen propulsión diesel eléctrica, a turbinas o híbrida.

<sup>26</sup> Peso Muerto en Toneladas  
Proyecto Final de Carrera

Todos estos buques deberán alcanzar un determinado nivel EEDI que no exceda los *valores permisibles* para el tipo y tamaño del buque correspondiente. Los valores se irán reduciendo en tres incrementos de 10% para buques nuevos construidos a lo largo de un periodo de 12 años.

	Size	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Jan 2025 onwards
Bulk Carriers	>20,000 Dwt	0%	10%	20%	30%
	10-20,000 Dwt	n/a	0-10%*	0-20%*	0-30%*
Gas tankers	>10,000 Dwt	0%	10%	20%	30%
	2-10,000 Dwt	n/a	0-10%*	0-20%*	0-30%*
Tanker and combination carriers	>20,000 Dwt	0%	10%	20%	30%
	4-20,000 Dwt	n/a	0-10%*	0-20%*	0-30%*
Container ships	>15,000 Dwt	0%	10%	20%	30%
	10-15,000 Dwt	n/a	0-10%*	0-20%*	0-30%*
General Cargo ships	>15,000 Dwt	0%	10%	15%	30%
	3-15,000 Dwt	n/a	0-10%*	0-15%*	0-30%*
Refrigerated cargo carriers	>5,000 Dwt	0%	10%	15%	30%
	3-5,000 Dwt	n/a	0-10%*	0-15%*	0-30%*

**Tabla 2: Factores EEDI relativos a la línea de referencia para cada tipo de buque.**<sup>27</sup>

El factor de reducción debe interpolarse linealmente entre los dos valores dependiendo del tamaño del buque. El valor más bajo del factor de reducción debe aplicarse al buque de tamaño menor.

El EEDI ayudará a reducir las emisiones de carbono entre un 25-30% hacia 2030 en comparación con el escenario de negocios habitual. El índice se aplicará a los segmentos más grandes de la marina mercante mundial, y se espera que cubra alrededor del 70% de las nuevas flotas. Cabe remarcar que estas regulaciones proporcionan una revisión del estado de los desarrollos tecnológicos para permitir enmiendas en los periodos de tiempo, y por si fuera necesario establece una línea de referencia de los parámetros EEDI para numerosos tipos de buques y velocidades de reducción.

Para concluir podría decirse que el índice EEDI requiere que los nuevos barcos sean diseñados para ser energéticamente más eficientes, por lo que el trabajo futuro se centrará en tomar medidas de mercado para 2012. Estas medidas ofrecerán incentivos económicos a la industria marítima para invertir en barcos y tecnologías energéticamente más eficientes.

Las nuevas regulaciones también incluyen el Plan de Gestión de Eficiencia Energética para Buques, y esta vez para todos los barcos. Este plan establece un mecanismo para que los armadores aumenten la eficiencia energética de sus buques. Además proporciona un acercamiento a la monitorización del rendimiento de la eficiencia de un buque o flota, usando por ejemplo, el Índice Operacional de Eficiencia Energética<sup>28</sup> como una herramienta de referencia y/o monitorización.

El SEEMP insta a los armadores y operadores de buques en cada etapa de la operación del buque a revisar y considerar practicas operacionales y mejoras tecnológicas para optimizar el rendimiento de eficiencia energética de un buque. En este plan se establece cómo se

<sup>27</sup> Fuente: Zabi Bazari, Lloyd's Register, London, UK. Tore Longva, DNV, Oslo, Norway. "Assessment of IMO Mandated Energy Efficiency Measures for International Shipping."

<sup>28</sup> MEPC.1/Circ.684

pueden alcanzar los ahorros energéticos para cada barco individualmente (dependiendo del tipo de barco, de carga, su ruta, etc.). Existe una gran variedad de opciones, desde la optimización de la velocidad o la monitorización del clima, hasta el mantenimiento del casco.

El 31 de Octubre de 2011 se entregó el estudio<sup>29</sup> encargado por la IMO, muestra que la implementación de dichas medidas llevará a reducciones significativas de gases de efecto invernadero desde los barcos, especialmente reducciones en  $CO_2$ , como resultado de un mayor aprovechamiento energético. Las medidas tomadas consiguen reducir el consumo de combustible, lo que lleva a un considerable ahorro a la industria naviera. El estudio estima que para 2020 se reducirán 151,5 millones de toneladas anuales de  $CO_2$  desde la introducción de las nuevas medidas. Un número que para 2030 se incrementará hasta 330 millones de toneladas anuales.

El estudio que fue llevado a cabo por la sociedad clasificadora Lloyd's Register en colaboración con Det Norske Veritas, predice que las reducciones de emisiones  $CO_2$  resultantes de las medidas serán de un 13% en 2020 y un 23 por ciento en 2030.

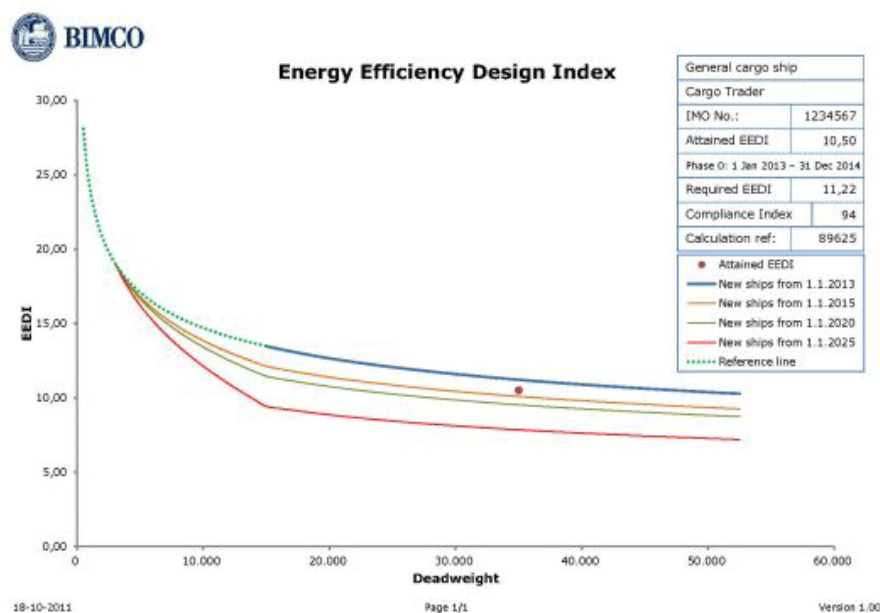
El Comité de Protección del Medio Marino de la Organización Marítima Internacional, se reunió en su 63ª sesión del 27 febrero al 2 de marzo del 2012, adoptando así una importante serie de directrices con el fin de apoyar la aplicación uniforme de las medidas obligatorias para aumentar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte marítimo internacional. Allanando así el camino para que las administraciones y la industria apliquen suave y uniformemente la reglamentación.

El Comité adoptó cuatro conjuntos de directrices destinadas a ayudar en la aplicación de las regulaciones obligatorias sobre eficiencia energética para los buques del Anexo VI del MARPOL, que se espera que entre en vigor el 1 de enero de 2013:

- Directrices sobre el método de cálculo del Índice de Diseño Eficiencia Energética alcanzado (EEDI) para los buques nuevos;
- Directrices para la elaboración de un Plan de Gestión Eficiencia Energética del Buque (SEEMP);
- Directrices sobre reconocimientos y certificación del índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI), y
- Directrices para el cálculo de las líneas de referencia para su uso con el Índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI).

---

<sup>29</sup> 'Assessment of IMO mandated energy efficiency measures for international shipping' Zabi Bazari, Lloyd Register, UK. Tore Longva, DNV, Oslo.



**Figura 7: Calculadora del Índice de Diseño de Eficiencia Energética de BIMCO.<sup>30</sup>**

En respuesta a las dudas de los miembros en cuanto a la aplicación de la metodología de cálculo contenida en las directrices de la IMO, la sociedad BIMCO<sup>31</sup> ha creado una calculadora de EEDI.

La calculadora inicial EEDI versión 1.10 fue una implementación de la directriz de cálculo contenida en la circular IMO MEPC.1/Circ.681. La directriz para el cálculo sigue siendo revisada por MEPC, y BIMCO está ahora desarrollando una versión actualizada 1.30 de la Calculadora EEDI enmendado de acuerdo con las directrices contenidas en EE-WG 2/WP.1.

El EEDI es un índice de diseño de eficiencia energética que es requerido como parte del Certificado IAPP para buques nuevos de ciertas categorías: graneleros, gaseros, buques tanque, portacontenedores, de carga general, refrigerados y cargueros combinados. Los buques de estas categorías deben tener un EEDI asignado antes de entrar en servicio y por encima de cierto umbral de tamaños deben tener un EEDI inferior a un valor requerido.

La calculadora de EEDI proporciona cálculos tanto para el EEDI sujeto al buque y también al requerido, si es aplicable.

El único valor crítico cuando se calcula el EEDI logrado es la velocidad del buque en la condición de índice. La calculadora EEDI ayuda a calcular la potencia propulsora y la capacidad de peso muerto para la condición índice y entonces es proporcionada al usuario de la calculadora para obtener la velocidad de referencia correlacionada.

La calculadora EEDI representa el EEDI obtenido en relación a la línea del tipo de buque específico referencia y las líneas límite asociadas para el EEDI requerido.

<sup>30</sup> Fuente: The Baltic and International Maritime Council:  
<https://www.bimco.org/en/Products/EEDI.aspx>

<sup>31</sup> Consejo Marítimo Báltico e Internacional. The Baltic and International Maritime Council.

#### 4.- El viento en navegación.

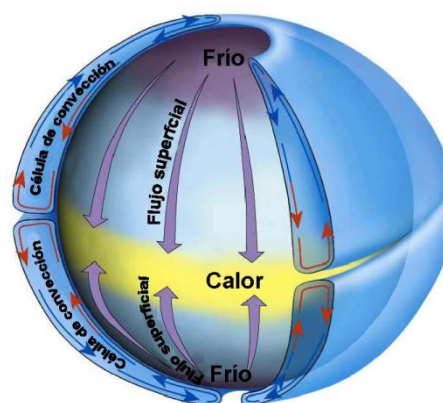
El viento es el resultado del flujo de gases a gran escala, y está siempre presente en la superficie del planeta. Es caprichoso, y nunca se sabe con antelación cómo va a soplar, pero aun así fue el que permitió a los grandes navegantes de los siglos XV y XVI dar la vuelta al mundo.

##### 4.1.- Circulación Atmosférica Global<sup>32</sup>

El Sol calienta la totalidad de la Tierra, pero la distribución del calor a lo largo de la superficie terrestre no es homogénea porque las regiones ecuatoriales y tropicales reciben mucha más energía solar que las latitudes medias y las regiones polares.

La radiación que reciben los trópicos es mayor de las que son capaces de emitir, mientras que las zonas polares emiten más radiación de la que reciben. Si no hubiera transferencia de calor entre los trópicos y las regiones polares, los trópicos se calentarían más y más, y los polos estarían cada vez más fríos. Este desequilibrio de calor latitudinal es el origen de la circulación de la atmósfera y los océanos: la energía calorífica se redistribuye desde las regiones más cálidas hasta las más frías por medio de la circulación del aire (60%) y las corrientes oceánicas (40%).

Una forma de llevar a cabo la transferencia de calor desde el ecuador hasta los polos consiste en una única célula de circulación que sube desde los trópicos hacia los polos, y desciende desde los polos y hacia el ecuador en la superficie. Este es el modelo de circulación de una célula, propuesto por primera vez por Hadley en el 1700.



**Figura 8: Hipotética circulación atmosférica de la Tierra sin rotación<sup>33</sup>**

La circulación global sería sencilla si la Tierra no rotase y la rotación no estuviese inclinada hacia el Sol, pero como no es así, el eje está inclinado y hay más masas de tierra en el hemisferio norte que en el hemisferio sur, el patrón global actual es mucho más complicado. En lugar de un modelo de una célula, la circulación global consiste en un modelo de tres células tanto para el hemisferio norte como para el sur. Estas tres células son la célula tropical, la célula de latitud media y la célula polar.

En la Célula Tropical<sup>34</sup>, el aire de latitudes bajas que fluye hacia el ecuador, y se eleva verticalmente debido al calor, con sentido hacia los polos en la parte alta de la atmósfera. Esto forma una célula de convección que domina los climas tropicales y subtropicales.

<sup>32</sup> Environmental Science Published for Everybody Round the Earth Educational Network on Climate [http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2\\_Sistemas\\_de\\_circulaci\\_n/-\\_Circulaci\\_n\\_global\\_3bg.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2_Sistemas_de_circulaci_n/-_Circulaci_n_global_3bg.html)

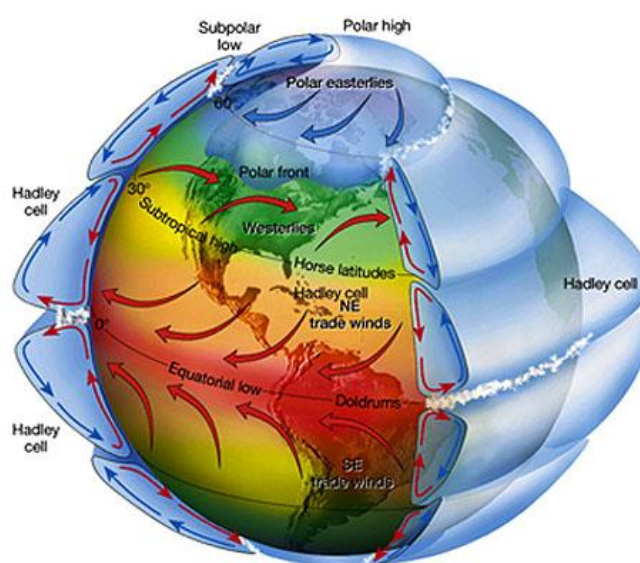
<sup>33</sup> Fuente: Website of the National Weather Service, Southern Regional Headquarters - US

<sup>34</sup> Célula Hadley



La Célula de latitud media<sup>35</sup> es una célula de circulación atmosférica de latitudes medias que fue descubierta por Ferrel en el siglo XIX. En esta célula, el aire cercano a la superficie fluye hacia los polos y hacia el este y el aire de niveles más altos en sentido hacia el ecuador y al oeste.

En la Célula Polar el aire se eleva, diverge y viaja hacia los polos. Una vez que se encuentra encima de los polos, el aire se hunde y forma las zonas polares de altas presiones. En la superficie el aire diverge hacia fuera de esas zonas de altas presiones. Los vientos superficiales de la célula polar son vientos del este.



**Figura 9: Modelo de tres células sobre circulación atmosférica.**<sup>36</sup>

Este modelo de tres células es efectivo para una descripción inicial, pero sigue siendo demasiado simplificado. No obstante, supone un buen comienzo para explicar las características principales.

Debido a que la fuerza de Coriolis, que actúa desviando hacia la derecha el flujo del viento en el hemisferio norte, el movimiento de las tres células se ve desviado. Esto provoca en la superficie terrestre tres cinturones de viento principales en cada uno de los hemisferios; los vientos alisios en los trópicos, los vientos predominantes del oeste y los vientos polares del este. Las zonas de calmas ecuatoriales son regiones cercanas al ecuador donde los vientos alisios de ambos hemisferios se encuentran. Aquí también se encuentra la zona de convergencia intertropical, que se caracteriza por el calor, el tiempo húmedo con vientos suaves y por las grandes selvas tropicales. Estas zonas se mueven hacia el sur en enero y hacia el norte en julio.

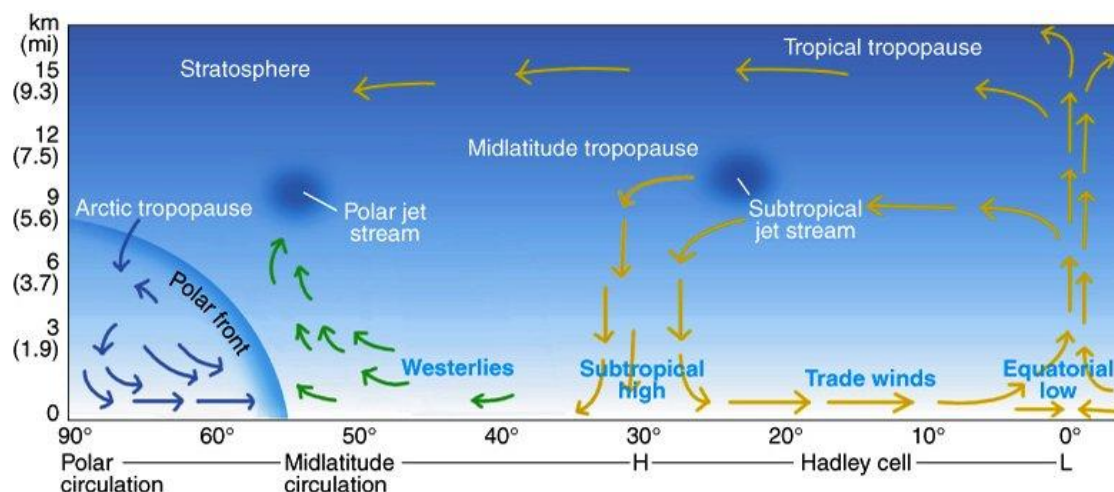
Las latitudes de caballo son regiones situadas entre los vientos alisios y los predominantes del oeste. En esta zona los vientos son generalmente suaves y calmados, y se

<sup>35</sup> Célula Ferrel

<sup>36</sup> Fuente: Short, Nicholas M. FIG07\_006.jpg. Digital image. ATMOSPHERIC CIRCULATION; WEATHER SYSTEMS. Nasa. Web. 13 Oct. 2011. <rst.gsfc.nasa.gov>.

llaman así porque los barcos solían echar por la borda a sus caballos debido a la falta de comida y de agua.

La Zona de Convergencia<sup>37</sup> Intertropical es la más importante de las líneas de convergencia de carácter permanente que existe en la tierra, y su origen se debe al extraordinario calentamiento experimentado en las bajas latitudes, por lo que el aire se eleva en las proximidades del ecuador afluyendo a él para mantener el tiro de esta chimenea. Las zonas donde se desarrolla la convergencia, se producen corrientes de aire ascendente.



**Figura 10: Cinturones de presiones asociados a las células de circulación atmosférica.**<sup>38</sup>

El modelo de las tres células tiene asociados los siguientes cinturones de presión:

- Las Bajas Presiones Ecuatoriales son un cinturón de bajas presiones asociado al ascenso del aire de la ZCIT. El ascenso de aire caliente del ecuador genera un área de bajas presiones llamada Zona Ecuatorial de Bajas Presiones y a medida que el aire se eleva, va creando nubes y da lugar a precipitaciones.
- Las Altas Presiones Subtropicales son un cinturón de altas presiones asociado con el descenso del aire de latitudes de caballo. En las zonas subtropicales el aire se enfría y desciende creando áreas de altas presiones con cielos claros y despejados y pocas precipitaciones, llamadas Zonas Subtropicales de Altas Presiones. El aire que desciende es cálido y seco, originando desiertos en estas regiones.
- Las Bajas Presiones Subpolares son un cinturón de bajas presiones relacionado con el frente polar.
- Las Altas Presiones Polares son una zona de altas presiones relacionado con el aire frío y denso de las regiones polares.

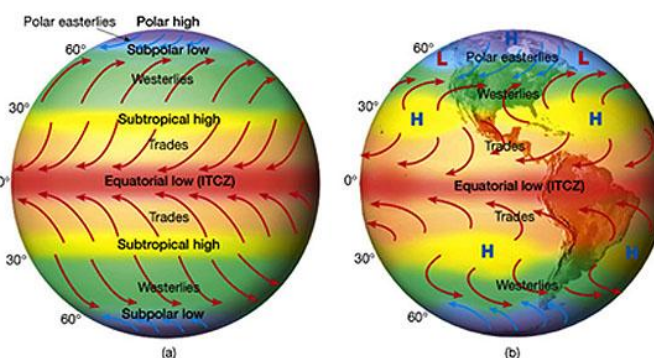
<sup>37</sup> Se denomina zona de convergencia si la velocidad del aire que entra en un recinto gaseoso es superior a la del aire que sale.

<sup>38</sup> Fuente: Semi permanent High and Low Pressure Areas Atmospheric Circulation and Surface Wind Belts. <http://www.sci.uidaho.edu/scripter/geog100/lect/04-atmos-oceanic-circ/ch4-part-5-high-low-areas-wind-belts.htm>



Como hemos visto, el modelo de circulación de tres células es una idealización, ya que en realidad los vientos no son constantes y los cinturones de presión no son continuos.

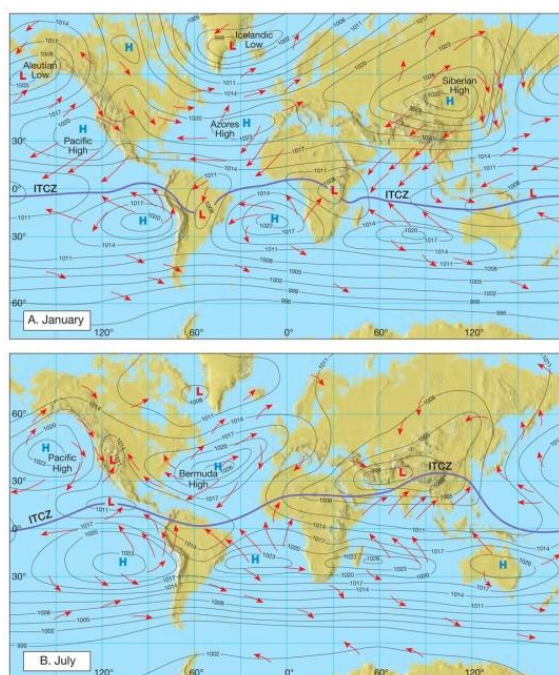
Una Tierra imaginaria y uniforme tendría unos cinturones de presión idealizados y continuos, pero la tierra real tiene variaciones sobre el patrón zonal por grandes masas de tierra. Estas interrupciones convierten las zonas de presiones en cinturones semipermanentes de altas y bajas presiones.



**Figura 11: Cinturones de presión "Ideales" y "Reales".**<sup>39</sup>

Las tres razones principales por las que la distribución de los cinturones de presión reales tienen una distribución distinta a los ideales, son que en primer lugar, la superficie de la Tierra no es plana ni uniforme lo que supone un calentamiento no homogéneo debido a los contrastes entre las zonas con tierra y agua. En segundo lugar, el movimiento del viento puede volverse inestable generando "remolinos" y por último que el Sol no permanece inmóvil sobre el ecuador, sino que se mueve entre las latitudes 23,5N y 23,5S a lo largo del año.

Por ello hay en realidad sistemas semipermanentes de altas y bajas presiones. Son semipermanentes porque varían en su posición e intensidad a lo largo del año. Como hemos comentado antes, las zonas semipermanentes de bajas presiones, experimentan una circulación de los vientos a su alrededor en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido anti horario en el hemisferio sur.



Copyright © 2006 Pearson Prentice Hall, Inc.

**Figura 12: Distribución de las zonas de presiones y vientos geostrofos asociados.**<sup>40</sup>

<sup>39</sup> Fuente: Federation of American Scientists, "How do we survive here on earth: Sustainability".

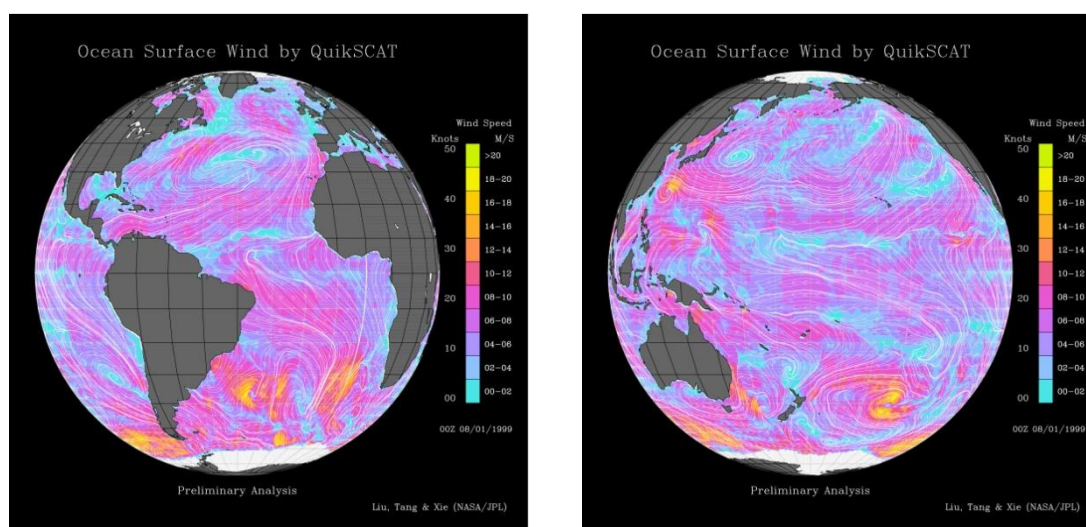
[http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect14/FIG07\\_007.jpg](http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect14/FIG07_007.jpg)

<sup>40</sup> Fuente: Average surface pressure and associated global circulation for A. January and B. July. (Fuente: Pearson Prentice Hall). <http://www.iupui.edu/~g115/mod08/lecture09.html>

El viento geostrófico es la corriente resultante de la interacción del viento de gradiente y la fuerza aparente de desviación de Coriolis, de modo que la dirección y la intensidad del viento son consecuencia del equilibrio entre ambas fuerzas generadoras. La fuerza de gradiente viene determinada por la diferencia de presión atmosférica entre dos puntos y viene representada gráficamente por la distancia entre líneas isobáricas en un mapa sinóptico de superficie. Cuando más apretadas están las líneas isobáricas, más viento habrá en esa zona.

Así que el aire tendería a ir directamente y por el camino más recto o corto posible desde las altas hasta las bajas presiones, pero la desviación de Coriolis implica que esta corriente de aire se desvíe hacia la derecha en el hemisferio norte. Así, el viento geostrófico resultante de ambos describe una trayectoria helicoidal desde las altas presiones hasta las bajas, girando en sentido horario en el seno de los anticiclones o en sentido anti horario en las borrascas cuando se produce en el hemisferio norte, al contrario que en el sur. El viento que nos interesa a la hora de propulsar buques mediante sistemas eólicos es el viento en superficie, ya que siempre nos encontraremos a nivel del mar, salvo en el caso de emplear cometas, que pueden llegar a realizar vuelos a mayores alturas.

Hoy en día existen diversos modos de conocer cuáles son las características de los vientos en superficie de los océanos, como pueden ser sistemas de boyas distribuidas a lo largo de los océanos o satélites que son capaces de medir cual es la dirección e intensidad de los vientos en superficie en todo el planeta.



**Figura 13: Velocidad del viento en superficie en los océanos. QuikSCAT. NASA.**<sup>41</sup>

El hecho de que existen diversos sistemas que llevan años tomando datos sobre la intensidad y dirección del viento, hace posible la representación estadística de las características principales del viento a lo largo del año, de modo que puede aproximarse cuál será la frecuencia de estos en función de la estación y zona, con el fin de predecir la probabilidad de ahorrar combustible con sistemas de propulsión eólicos, además de la tracción que podremos obtener de los mismos.

<sup>41</sup> Fuente: SeaWinds Captures Fury of Typhoon Olga.

[http://winds.jpl.nasa.gov/publications/olga\\_pics.cfm](http://winds.jpl.nasa.gov/publications/olga_pics.cfm)

## 5.- Introducción a la propulsión eólica.

Durante miles de años, se han ido mejorando las técnicas de aprovechamiento de la energía del viento, para propulsar los buques por los océanos. Se fueron añadiendo velas a los veleros, y probando diferentes configuraciones con el fin de sacar el máximo partido al viento en superficie predominante en el mar.

Tan sólo hace 100 años que las máquinas propulsoras que queman carbón y combustibles fósiles se han hecho con el rol de la propulsión en el transporte marítimo. Y es justo en este periodo de 100 años, donde nuestro saber hacer técnico se ha desarrollado inmensamente, en ingeniería mecánica y estructural, en flujo de fluidos, control y tecnología de la información. Ahora entendemos, como funciona la propulsión a viento y la podríamos aplicar más eficientemente.

Una cuestión clave sobre el transporte marítimo sostenible es la reducción progresiva y un reemplazamiento final de la combustión de los combustibles fósiles para reducir y eliminar las emisiones relacionadas además de preservar los recursos fósiles.

Si se aplicase la propulsión con viento combinada con otros medios de reducción de las emisiones, podría llegar a obtenerse una gran eficiencia en la operación de los buques mercantes de navegación oceánica.

Desde hace mucho tiempo, existe un amplio rango de soluciones tecnológicas que permiten el aprovechamiento de la energía del viento, y no siempre han sido empleadas debido a la falta de necesidad o de rentabilidad de la época. Aunque puede que haya llegado el día, en el que hay que rescatar estos viejos inventos, con el fin de solventar problemas actuales. Estos medios de propulsión pueden dividirse en tres tipos principalmente:

- Las velas
- Las cometas
- Los rotores

Estos sistemas tienen diferentes formas, distribuciones y materiales que los hacen más efectivos en unas condiciones que en otras, de modo que conviene comentar los diversos principios aerodinámicos que nos permitirán cuantificar el rendimiento de los diferentes medios de propulsión eólica.

Con la aparición de la propulsión mecánica, apareció una diferenciación de los buques en función de la procedencia de la energía empleada para su propulsión.

El término “Sail-assist” es un término que fue creado para describir la porción del espectro de propulsión a viento, en el que la mayoría de la energía propulsora es generada por la maquinaria, principalmente, sobre un propulsor de hélice, y la energía obtenida de la vela es utilizada como una fuente auxiliar, para ahorrar combustible y/o para incrementar la velocidad.

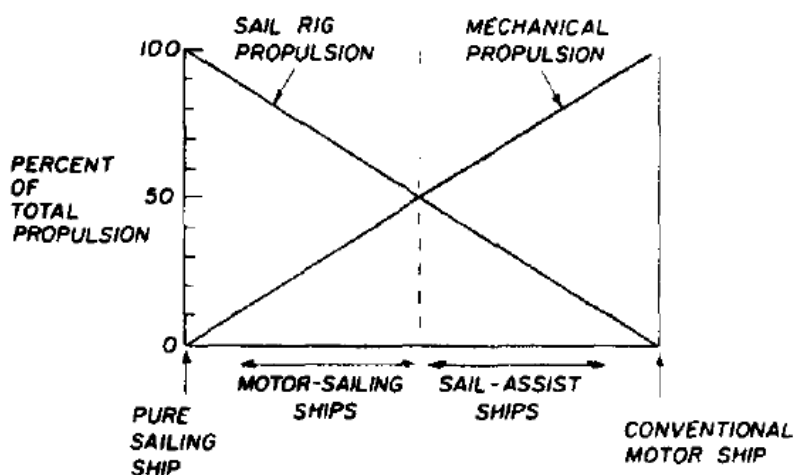


Figura 14: Espectro de la propulsión por viento.<sup>42</sup>

Con la figura 14 se facilita la comprensión y la diferenciación entre los dos conceptos distintos de propulsión en los buques. En los buques propulsados por viento, el porcentaje de la propulsión que representa sus motores es mínimo, mientras que en los buques puramente propulsados por motores pasa lo contrario. Por lo tanto, con esta clasificación se pretende diferenciar entre los buques de propulsión a viento ayudados por motores<sup>43</sup> y los buques a motor ayudados por el viento<sup>44</sup> mediante diversos tipos de generadores de sustentación.

<sup>42</sup> Fuente: *Sail assist developments 1979–1985* Lloyd Bergeson. Wind Ship Company, Norwell, MA., USA  
C. Kent Greenwald (Consultant & Formerly Chief Research Engineer) Wind Ship Company, USA.

<sup>43</sup> En inglés: Motor-assisted ship.

<sup>44</sup> En inglés: Sail-Assisted ship.

## 5.1.- Principios Aerodinámicos.

Aerodinámica es la parte de la mecánica de fluidos que estudia los gases en movimiento y las fuerzas o reacciones a las que están sometidos los cuerpos que se hallan en su flujo.

Hay ciertas leyes de la aerodinámica, aplicables a cualquier objeto moviéndose a través del aire, que explican el vuelo de objetos más pesados que el aire. Para el estudio del vuelo, es lo mismo considerar que es el objeto el que se mueve a través del aire, como que este objeto esté inmóvil y es el aire el que se mueve, de forma se pueden hacer pruebas en túneles de viento con diversos perfiles alares, con el fin de obtener las características de las mismas.

### 5.1.1 Los perfiles aerodinámicos.

Daniel Bernoulli comprobó experimentalmente que "en un fluido en movimiento, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante". Por lo tanto, para que se mantenga esta constante  $k$ , si una partícula aumenta su velocidad será a costa de disminuir su presión, y a la inversa.

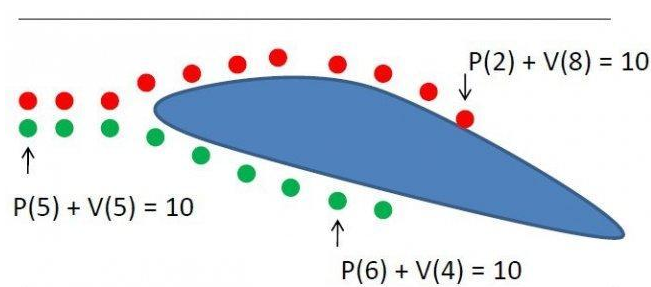


Figura 15: Representación del Teorema de Bernoulli.<sup>45</sup>

El teorema de Bernoulli se suele expresar de la siguiente forma:

$$P_t = P_e + 0.5 \cdot \rho \cdot V_f^2 = k \quad [2]$$

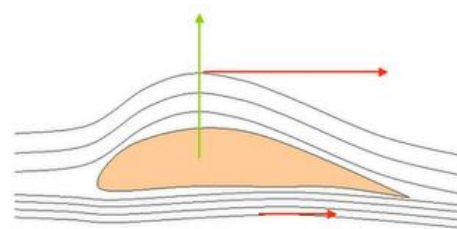
$$0.5 \cdot \rho \cdot V_f^2 = P_d \quad [3]$$

Por tanto, si colocamos un objeto plano un poco inclinado hacia arriba contra el viento, este producirá una sustentación, como sucede por ejemplo con una cometa. Un perfil aerodinámico, es un cuerpo que tiene un diseño determinado para aprovechar al máximo las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando este perfil se sitúa en una corriente de aire. Las alas de los aviones son un buen ejemplo de diseño avanzado de perfil aerodinámico.

<sup>45</sup> Fuente: <http://www.xatakaciencia.com/fisica/como-vuela-un-avion-y-iv>

Veamos que sucede cuando un aparato dotado de perfiles aerodinámicos (alas) se mueve en el aire, a una cierta velocidad y con determinado ángulo de ataque con respecto a un viento relativo, de acuerdo con las leyes explicadas.

El ala produce un flujo de aire en proporción a su ángulo de ataque y a la velocidad con que el ala se mueve respecto a la masa de aire que la rodea; de este flujo de aire, el que discurre por la parte superior del perfil tendrá una velocidad mayor<sup>46</sup> que el que discurre por la parte inferior. Esa mayor velocidad implica menor presión<sup>47</sup>.

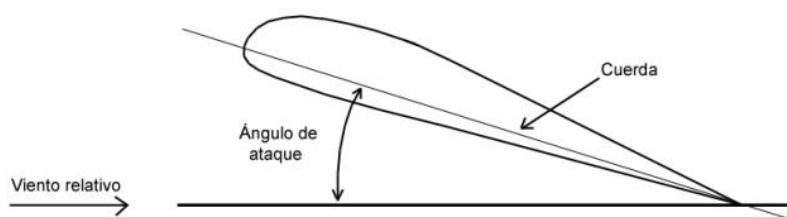


**Figura 16: Presión y velocidad en un ala.**<sup>48</sup>

La diferencia de presiones entre la superficie superior del ala que soporta menos presión que la superficie inferior, produce una fuerza aerodinámica que empuja al ala de la zona de mayor presión hacia la zona de menor presión, tal como describe la Tercera Ley del Movimiento de Newton.

Pero además, la corriente de aire que fluye a mayor velocidad por encima del ala, al confluir con la que fluye por debajo desvía a esta última hacia abajo, produciéndose una fuerza de reacción adicional hacia arriba. La suma de estas dos fuerzas es lo que se conoce por fuerza de sustentación y es la que mantiene a los aviones en el aire.

La cuerda de un ala, es la línea recta imaginaria que une el borde de salida con el centro de curvatura del borde de ataque de un perfil alar o de un alabe cualquiera. Se denomina ángulo de ataque, al ángulo resultante entre el viento aparente y la cuerda del perfil alar.



**Figura 17: Relación entre la cuerda y ángulo de ataque de un ala.**<sup>49</sup>

<sup>46</sup> Efecto Venturi.

<sup>47</sup> Teorema de Bernoulli.

<sup>48</sup> Fuente: Efecto Bernoulli sobre un Ala. <http://www.futm.org/futm/science/aerodynamics.htm>  
Aerodinámica de la pelota deportiva - Aerodinámica de la pelota de tenis de mesa por Roberto Miglietti (J) - Junio 2006

<sup>49</sup> Fuente: <http://aeronauticorner.blogspot.com.es/2009/05/principios-de-aerodinamica.html>



### 5.1.2.- Fuerzas que actúan sobre los perfiles aerodinámicos.

Los perfiles aerodinámicos se ven afectados por una serie de fuerzas cuando se encuentran en un flujo de aire. Tal como se muestra en la figura 18, en el caso de objetos voladores actúan cuatro fuerzas básicas sobre las alas: la sustentación, el peso, el empuje y la resistencia.

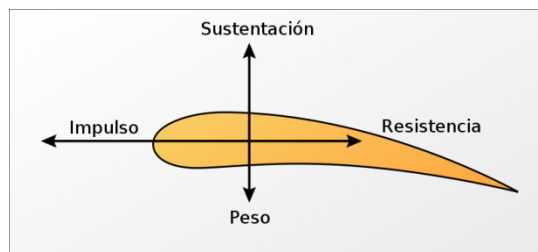


Figura 18: Fuerzas básicas sobre las alas.<sup>50</sup>

Los perfiles aerodinámicos pueden ser aplicados en la navegación marítima para propulsar buques, de modo que son instalados verticalmente al buque, y pueden rotar sobre sí mismos para orientarse al viento aparente. En esta aplicación, se deja de considerar el peso a la hora de calcular las fuerzas aerodinámicas resultantes.

Cuando se somete un perfil aerodinámico a un flujo de aire, como puede ser el viento, aparece una fuerza aerodinámica resultante, que varía en función del ángulo de ataque del mismo. Esta puede descomponerse en la fuerza de sustentación y la fuerza de resistencia aerodinámica.

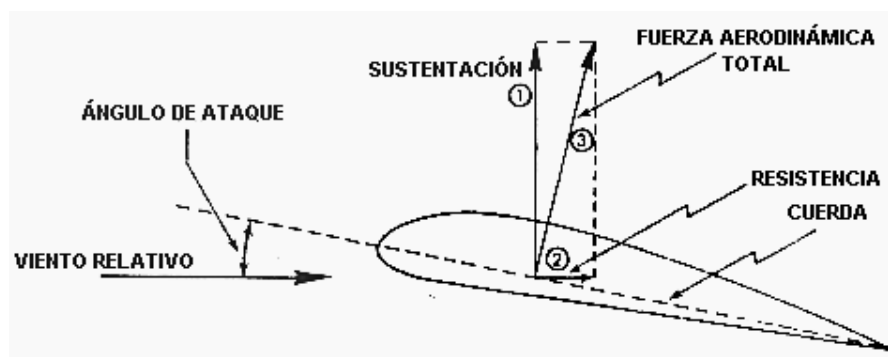


Figura 19: Fuerzas actuantes sobre un plano aerodinámico.<sup>51</sup>

A medida que un perfil aerodinámico varía su ángulo de incidencia con respecto al viento, también lo hacen las fuerzas de sustentación  $L$  y de resistencia aerodinámica  $C$ , que forman la resultante fuerza aerodinámica total  $T_{af}$ . Por esta razón, se deben conocer las características de cada perfil aerodinámico, con el fin de encontrar que diseño puede proporcionar mayores beneficios a la propulsión marítima.

$$T_{af} = \sqrt{L^2 + C^2} \quad [4]$$

<sup>50</sup> Fuente: <http://www.esacademic.com/pictures/eswiki/65/Aerofuerzas.jpg>

<sup>51</sup> Fuente: [http://www.wikilearning.com/articulo/aerodinamica\\_basica-fuerza\\_aerodinamica/15201-1](http://www.wikilearning.com/articulo/aerodinamica_basica-fuerza_aerodinamica/15201-1)

La Sustentación  $L$  es la fuerza desarrollada por un perfil aerodinámico al moverse a través del flujo de un fluido, ejercida de la zona de mayor a la zona de menor presión, y cuya dirección es perpendicular al viento relativo. Se suele representar con la letra  $L$  del inglés Lift.

Como con otras fuerzas aerodinámicas, en la práctica se utilizan coeficientes adimensionales que representan la efectividad de la forma de un cuerpo para producir determinadas fuerzas y se usan para facilitar los cálculos y los diseños. El modelo matemático de la fuerza de sustentación es:

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L V^2 A \quad [5]$$

Como puede observarse, la fuerza de sustentación  $L$  es proporcional a la superficie  $A$ , a la densidad del aire  $\rho$ , al coeficiente de sustentación  $C_L$  y al cuadrado de la velocidad del viento relativo. Como el interés radica en controlar la sustentación resultante, se vuelve conveniente el poder influir en el mayor número de factores posibles. De modo que se identifican la densidad del aire como constante, y se pretende analizar la influencia de los demás factores en los diversos sistemas existentes.

El coeficiente de sustentación depende directamente del tipo de perfil y del ángulo de ataque del viento relativo. Por tanto, los valores de  $C_L$  y la forma de la gráfica para cada tipo de perfil dependerán de cada perfil en concreto. Como se verá más adelante, en el caso de los rotores, el valor de los coeficientes asociados de sustentación y resistencia, dependen de la relación entre la velocidad de rotación de los cilindros y la velocidad del viento.

A lo largo de los años, se han diseñado diversos sistemas generadores de sustentación, para utilizar el viento para propulsar buques, de modo que cada vez se han intentado obtener mayores coeficientes de sustentación, con el fin de obtener mayores fuerzas a partir del viento.

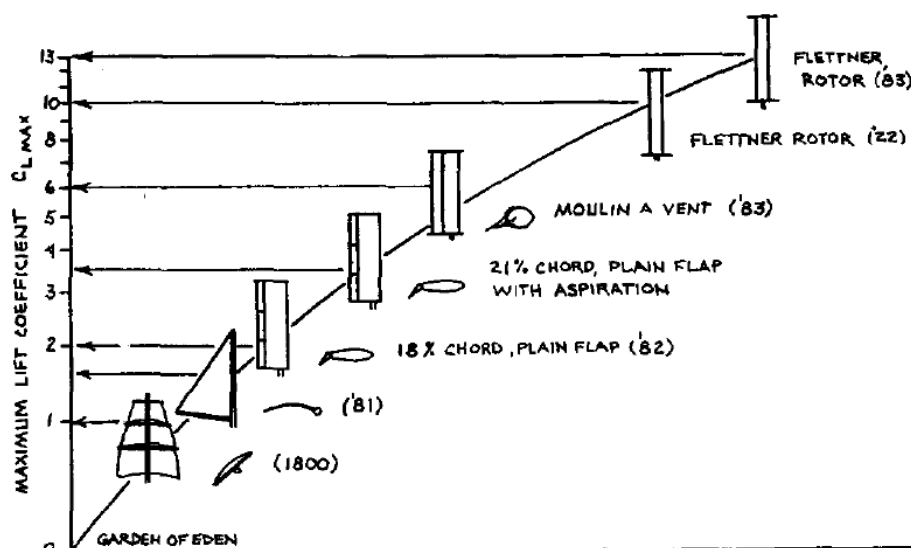


Figura 20: Máximos coeficientes de sustentación de diversos sistemas de propulsión.<sup>52</sup>

<sup>52</sup> Fuente: *Sail assist developments 1979–1985* Lloyd Bergeson. Wind Ship Company, Norwell, MA., USA  
C. Kent Greenwald (Consultant & Formerly Chief Research Engineer) Wind Ship Company, USA.



Como puede observarse en la figura 19, la resistencia aerodinámica  $D$  actúa en sentido paralelo y en la misma dirección que el viento relativo, oponiéndose al avance del perfil aerodinámico. Su valor viene determinado por la siguiente fórmula:

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D V^2 A \quad [6]$$

Esta fuerza depende proporcionalmente de los mismos factores que en la sustentación salvo en el coeficiente adimensional de resistencia  $C_D$ , que también viene dado por las características de cada perfil y del ángulo de ataque con respecto al viento.

A lo largo de los años, y después de muchos experimentos, se han ido definiendo los coeficientes tanto de sustentación como de resistencia al avance de cada uno de los perfiles aerodinámicos existentes. Esto ha servido para ir mejorando el rendimiento de los mismos en base a las fuerzas resultantes que querían obtenerse.

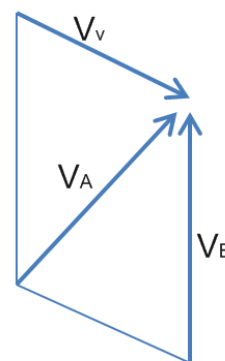
La eficiencia aerodinámica<sup>53</sup> es la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de resistencia aerodinámica, de modo que es un valor muy útil a la hora de cuantificar el comportamiento de los diversos sistemas ante determinados ángulos y velocidades del viento. De modo que se crearon unas tablas que representaban el coeficiente sustentación en función del coeficiente de resistencia al avance de cada perfil, con el fin de valorar en qué condiciones eran más eficientes.

Aunque de primera instancia podría pensarse que lo más conveniente es obtener una máxima sustentación en cada momento, debe tenerse en cuenta que esta situación también acarrea una resistencia al avance asociada, por lo que se hace necesario buscar la mejor proporción entre ambas fuerzas, lo que supondría una mejor interpretación de la posible energía aprovechable.

### 5.1.3.- El viento aparente a bordo de un buque en navegación.<sup>54</sup>

Un concepto importante a la hora de navegar en zonas con viento es la diferencia entre el viento verdadero y el viento aparente. El viento verdadero es el flujo de aire que se produce en la atmósfera debido a causas naturales, mientras que el viento aparente es el resultado de la resta vectorial del viento verdadero menos la velocidad del buque.

En la figura 21 se muestra la operación gráfica en la que se resta vectorialmente la velocidad del buque a la velocidad del viento verdadero.



**Figura 21: El viento aparente en navegación.**

El viento aparente es el flujo de aire que experimentaría alguien que se encontrase a bordo cuando el buque está en navegación, y es el viento que propulsa los buques de vela si

<sup>53</sup> En inglés Aspect-ratio. ( $C_L/C_D$ )

<sup>54</sup> "Viability study of sailing propulsion combined with a conventional system" Patricia Izaguirre, Luis Pérez, Francisco Pérez, Alberto Torres. Universidad Politécnica de Madrid. Canal de Ensayos ETSIN. Jul 2011

la contribución es positiva o incrementa la resistencia si la contribución es negativa. El signo de la contribución depende del ángulo de ataque entre la dirección del viento aparente y la vela. Generalmente se ha considerado que la contribución a la propulsión es positiva, si el ángulo del viento aparente está en el rango de 0° a 140° desde la popa hacia ambas bandas, para las velas de alto rendimiento. Este rango depende de la geometría de la vela. Por lo tanto, la diferencia entre el viento verdadero y el viento aparente es la velocidad del buque.

Obtener la intensidad del viento aparente en función de la velocidad del viento verdadero y la velocidad del buque es un simple problema geométrico que puede ser resuelto con la siguiente ecuación:

$$V_A = \sqrt{(V_V \cdot \cos(AV_V) - V_B)^2 + (V_V \cdot \sin(AV_V))^2} \quad [7]$$

Donde  $AV_V$  es el ángulo del viento verdadero, del mismo modo que  $AV_A$  es el ángulo del viento aparente.

$$AV_A = \cos^{-1} \left( \frac{V_V \cdot \cos(AV_V) - V_B}{V_A} \right) \quad [8]$$

Con estas dos ecuaciones se puede empezar un estudio sobre la viabilidad de un sistema de propulsión combinado. Primero debe analizarse, a una velocidad constante de un buque el viento verdadero necesario para generar una contribución positiva de una vela. Esto es que la velocidad del viento verdadero que genera vientos aparentes con ángulos inferiores a 140° a esa velocidad del buque. Para una velocidad del buque de 5 nudos, la velocidad del viento verdadero debería ser al menos, mayor de 4 nudos. Para un buque con una velocidad de 13 nudos, el viento verdadero debe ser superior a los 9 nudos, y para una velocidad del buque de 30 nudos, sería necesario un viento verdadero de al menos 20 nudos de velocidad. Por lo tanto, cuanto más rápido sea el buque, mayor velocidad del viento verdadero será necesaria para generar un viento aparente que se encuentre dentro del sector favorable.

Para valorar como influye la relación entre la velocidad del buque y la velocidad del viento verdadero, se han realizado tres series de tablas en las que se va rotando el viento verdadero desde la proa hasta la popa de un buque en navegación. Como ya se ha dicho, la proporción entre estas dos velocidades influye directamente tanto la velocidad del viento aparente como en su dirección.

Estas tablas se encuentran en el Anexo B, y van a permitir valorar como se relacionan el buque y el viento para formar el viento aparente que hace posible la propulsión de buques mediante la fuerza del viento.

Como puede observarse en la primera tabla del Anexo B, cuando un buque navega a la misma velocidad que el viento, el viento aparente siempre proviene de la proa, lo que limita el empuje hacia adelante a partir de la energía del viento. En cuanto refiere a la velocidad del viento aparente, es equivalente a la suma de ambas velocidades cuando estas se oponen, y va reduciéndose hasta llegar a cero cuando coinciden en rumbo.

En la segunda tabla, cuando la velocidad del viento es el doble que la del buque, puede observarse que el ángulo del viento aparente siempre es un poco menor que el del viento

verdadero, aunque rola de proa a popa progresivamente a medida que lo hace el viento verdadero, aunque con un ángulo inferior. En este caso el viento aparente alcanza el través del buque cuando el verdadero se encuentra a partir del 120 desde la proa. Por lo que hace a la velocidad del viento aparente en este caso, ésta es el resultado de la suma de la velocidad del buque y la del viento verdadero cuando se oponen en dirección y llega a alcanzar el valor de la diferencia entre la del buque y la del viento verdadero, cuando coinciden.

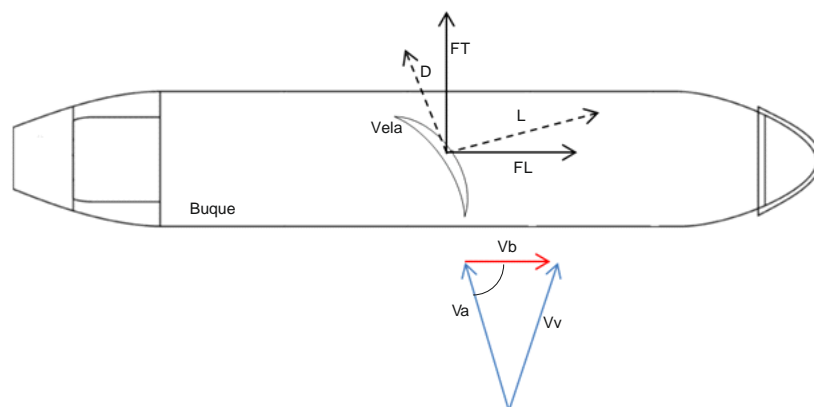
Por último podemos observar que si la velocidad del buque es el doble que la velocidad del viento verdadero, el viento aparente nunca superara los 30 grados desde la proa, dándose esta situación justo cuando el viento verdadero proviene del 120 desde la proa. Estos resultados demuestran porque en los buques de alta velocidad siempre vienen los vientos desde la proa, sea cual sea el rumbo del buque. La velocidad del viento aparente es la suma de las velocidades del buque y del viento verdadero cuando coinciden en rumbo, y a medida que se van oponiendo, disminuye hasta alcanzar el valor mínimo de la velocidad del viento.

Es necesario remarcar que la diferencia entre un buque de vela y un buque convencional con una vela. Los buques de vela navegan gracias al empuje del viento, por lo que la fuerza aerodinámica generada por el viento debe ser mayor que la resistencia hidrodinámica inducida por el mar. Cuando un buque está en reposo, y el viento verdadero empieza a interactuar con la vela, la fuerza aerodinámica comienza a incrementar, y si es lo suficientemente elevada, el buque empieza a desplazarse desde que la fuerza aerodinámica es igual a la resistencia hidrodinámica. Una vez se alcanza el equilibrio entre estas fuerzas, el buque navega a una velocidad constante.

Un buque de vela navega tan rápido como el viento le permite dependiendo del rumbo que es constantemente modificado para optimizar la velocidad del buque. Un buque comercial fuerza una velocidad constante y un rumbo porque hay un calendario que seguir, por lo que cuando se le instala a un buque convencional un sistema auxiliar de propulsión a viento, el objetivo de la combinación es la reducción del consumo de combustible, más que el aumento de velocidad. Normalmente la velocidad del buque y el rumbo son mantenidos constantes, de modo que a medida que mejora la contribución de las velas, se reduce la contribución de las máquinas principales y consecuentemente también se reduce el consumo de combustible.

### 5.1.4.- Fuerzas que actúan sobre el buque con velas tipo ala.

Si se considera la aplicación de velas con perfil alar instaladas verticalmente para propulsar un buque, deberán tenerse en cuenta todas las fuerzas que actúan sobre el mismo, con el fin de analizar cuáles son los efectos sobre la estabilidad y velocidad del mismo buque.



**Figura 22: Fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un buque con velas tipo ala.**<sup>55</sup>

Como se ha descrito anteriormente, las fuerzas que se ejercen sobre el perfil alar son las de sustentación y la de resistencia aerodinámica, que se transmiten al buque en el punto de anclaje de la superficie aerodinámica sobre el casco. Para cuantificar de una mejor forma estas fuerzas, se descomponen en dos fuerzas sobre un plano horizontal.

La fuerza longitudinal supone la propulsión adicional que proporciona el sistema de velas auxiliar en sentido longitudinal del buque, y también depende de un coeficiente de empuje longitudinal  $C_X$  adimensional, que viene dado por las características del perfil aerodinámico y del ángulo de ataque con el viento relativo.

$$FL = \frac{1}{2} \rho C_X V^2 A \quad [9]$$

La fuerza transversal sobre el buque, también se expresa con una ecuación similar, y es de gran ayuda a la hora de calcular el momento escorante que supone usar velas para la propulsión. Cuanto mayor sea la distancia del centro vélico al centro de gravedad del buque, mayor será el momento escorante resultante.

$$FT = \frac{1}{2} \rho C_Y V^2 A \quad [10]$$

Por esta razón, las velas retráctiles tienen una serie de ventajas sobre las velas rígidas convencionales, ya que puede variarse la altura y la superficie de las mismas, de modo que puede controlarse la influencia del viento sobre la escora, y sobre las fuerzas longitudinal y transversal transmitidas al buque ya que varía su superficie. Variando la superficie se actúa sobre ambas fuerzas, mientras que variando la altura, se influye sobre la fuerza transversal que produce la escora.

<sup>55</sup> Fuente Propia. Dibujo CorelDRAW Graphics Suite X5.

## 6.- Descripción de los sistemas de propulsión.

### 6.1.- Las Velas

Los diferentes tipos de velas para la propulsión mediante el viento pueden ser:

- Tradicionales<sup>56</sup>
- Rígidas.<sup>57</sup>

Todas ellas tienen sus características especiales y sus campos de aplicación. Las velas tradicionales blandas se han ido realizando de diversos materiales, de forma que son flexibles. Son las comúnmente conocidas a lo largo de la historia de la navegación. En cuanto a las velas tipo ala tradicionales podría decirse que pueden variar su área, su cámara, y las rígidas son unos perfiles robustos con forma de ala con flaps e incluso mayor relación sustentación-arrastre<sup>58</sup>.

Desde que los buques propulsados por viento sin motor son imposibles en nuestros días, se han considerado varios modos de combinación, desde buques a motor asistidos por viento, hasta buques a vela asistidos por motores.

Para buques de propulsión mecánica asistidos a una velocidad de servicio constante, las condiciones aparentes del viento relativo son concentradas al sector de proa, hasta cuando, en ida y vuelta, todos los rumbos hacia el viento verdadero son igualmente frecuentes. Esto significa que solo las opciones con una elevada relación sustentación-arrastre pueden proporcionar una ayuda eficiente.

Las opciones con una elevada sustentación con un correspondiente elevado arrastre inducido, como sistemas foil cortos, velas de succión o rotores, son menos deseables para este modo de maniobra.

---

<sup>56</sup> Soft Sail

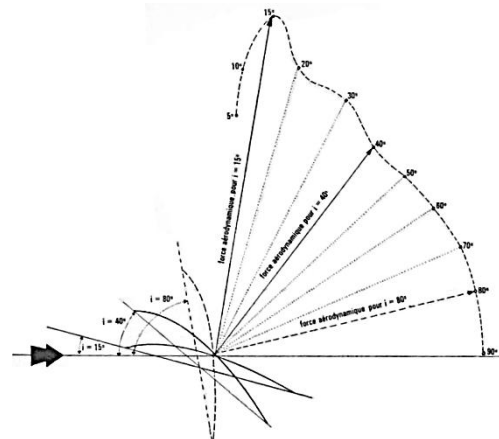
<sup>57</sup> Rigid Sail

<sup>58</sup> Lift-to-drag

### 6.1.1.- Las velas tradicionales.

#### 6.1.1.1.- Influencia de la forma de la vela en la fuerza aerodinámica generada.<sup>59</sup>

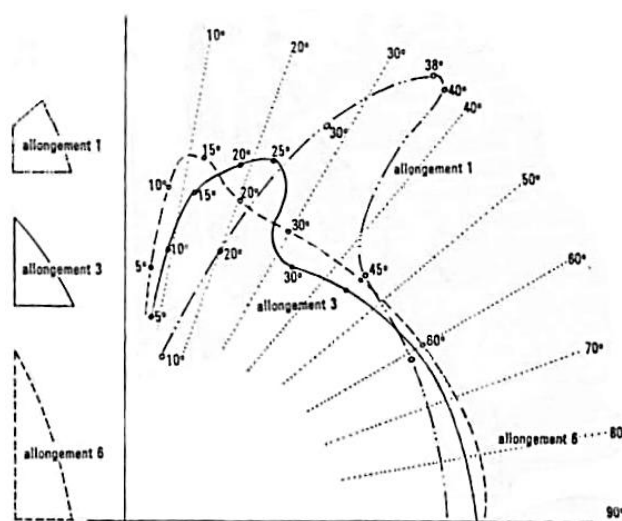
Cuando se varía el ángulo de ataque de una vela con respecto al viento relativo, también lo hace la fuerza aerodinámica generada por la vela, y por tanto también los coeficientes de sustentación y resistencia aerodinámica que la forman. En la figura 23 se representa la fuerza aerodinámica resultante, donde generalmente se expresan los valores del coeficiente de sustentación en las abscisas, y en las ordenadas los de la resistencia aerodinámica, siendo el centro de fuerzas el origen del sistema de ordenadas.



**Figura 23: Influencia del ángulo de ataque en las fuerzas aerodinámicas.**<sup>60</sup>

La relación de aspecto de una vela, es la proporción entre la altura y la longitud de la misma. De modo que se hace interesante también, valorar cómo influye esta proporción en las fuerzas resultantes obtenidas por la vela.

En la figura 24 se trazan 3 polares de tres velas de la misma superficie, de la misma cámara pero con diferente proporción de alargamiento. En primer lugar se trata de una vela de cuchillo cuadrada con una relación de aspecto de 1, la siguiente es triangular de 3 y la última es una vela Marconi, triangular con relación de aspecto de 6.



**Figura 24: Influencia de la forma de la vela en los coeficientes aerodinámicos  $C_L$  y  $C_D$ .**<sup>61</sup>

<sup>59</sup> Eiffel, Gustave (1913). "The Resistance of The Air and Aviation." London: Constable & Co Ltd.

Marchaj, C. A. (2003). "Sail performance : techniques to maximise sail power" (Rev. ed. ed.). London: Adlard Coles Nautical. pp. 147 figure 127 lift vs drag polar curves

<sup>60</sup> Fuente: Marchaj, C. A. (2003). Sail performance : techniques to maximise sail power (Rev. ed. ed.). London: Adlard Coles Nautical. lift vs drag polar curves

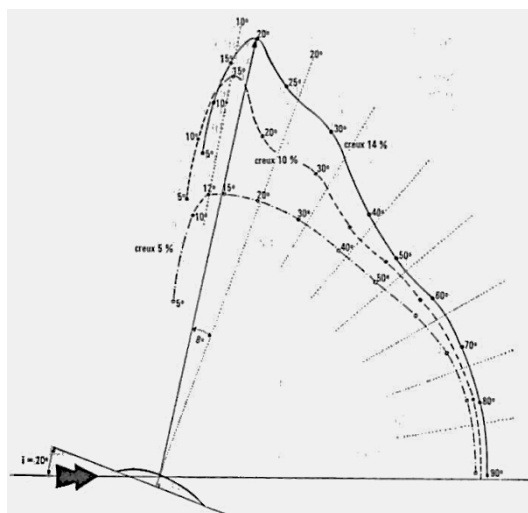
<sup>61</sup> Fuente: Marchaj, C. A. (2003). Sail performance : techniques to maximise sail power (Rev. ed. ed.). London: Adlard Coles Nautical. lift vs drag polar curves

De lo que puede remarcarse que:

- En ángulos de incidencia pequeños, la vela de mayor alargamiento es la que desarrolla la fuerza más importante y la mejor orientada.
- Para ángulos de incidencia entre 25 y 30 grados, la vela cuadrada desarrolla una fuerza mucho más importante que las velas Marconi, pero la pérdida de potencia debida al aumento de la resistencia aerodinámica es más importante cuando la fuerza se hace grande.

También puede comprenderse porque las velas tipo cuchillo son poco utilizadas en nuestros días, ya que pierden su eficacia por debajo de un ángulo de 25 grados, estas velas no permiten remontar fácilmente el viento.

En la figura 25, se muestran las polares de una misma vela configurada con diferentes valores de cámara:



**Figura 25: Influencia de la cámara en los coeficientes aerodinámicos  $C_L$  y  $C_D$ .<sup>62</sup>**

Recordemos que la cámara viene porcentualmente en función de la longitud del borde de la vela. Por lo que puede deducirse que cuanto mayor sea la cámara:

- Mayor será la fuerza aerodinámica desarrollada por la vela, siendo esta diferencia más importante para ángulos de incidencia débiles.
- Más reflejará la vela el viento de un ángulo importante sin inducir un elevado arrastre.
- Mas dirigida hacia adelante estará la fuerza aerodinámica.

En teoría, debería tener prioridad obtener la mayor cámara posible en las velas, pero es en vientos fuertes, cuando puede ser interesante reducirla para disminuir la resistencia aerodinámica desarrollada por la vela. Al influir la cámara en los coeficientes aerodinámicos, se

<sup>62</sup> Fuente: Marchaj, C. A. (2003). Sail performance : techniques to maximise sail power (Rev. ed. ed.). London: Adlard Coles Nautical. lift vs drag polar curves

demuestra el interés en variar la cámara del posible medio de propulsión del futuro, aunque esto aumenta los costes y el mantenimiento.

A principios del año 1979, la compañía americana Wind Ship comenzó una investigación intensiva sobre propulsión de buques mediante el viento. En 1981 la compañía informó a la Administración Marítima de EEUU con un artículo titulado “Wind Propulsion for Ships of the American Merchant Marine” identificando las velas con mayor potencial de desarrollo comercial y creó un diseño conceptual de velas tipo ala auxiliares para asistir en la propulsión de un buque a motor de 20.000Tm de peso muerto.

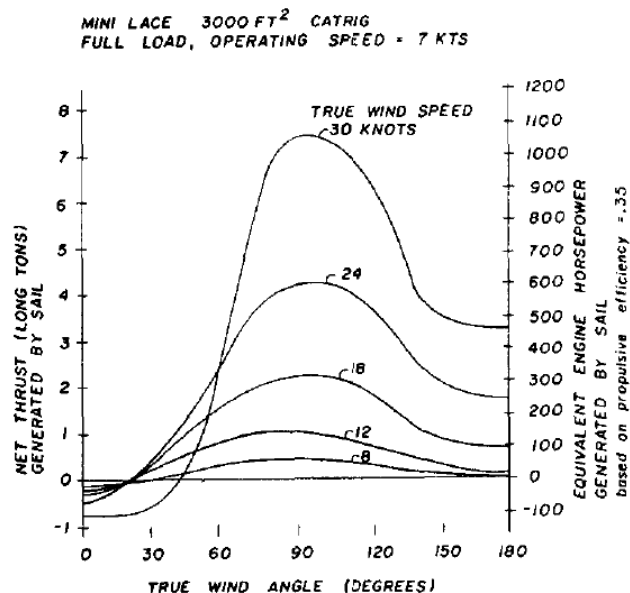


Los hallazgos descubiertos por la investigación animaron a Wind ship a continuar desarrollando este tipo de propulsores alternativos, y lideró el diseño, la construcción y la instalación de una vela triangular de tela de  $278,7 \text{ m}^2$  que entró en servicio comercial en septiembre de 1981 a bordo del M/V Mini Lace.

**Figura 26: Pruebas de mar M/V Mini Lace. 1981.**<sup>63</sup>

Se llevó a cabo un estudio de ingeniería para predecir los ahorros anuales de combustible para este buque. La potencia generada por la vela viene dada en función de las condiciones del viento en las que opera el buque, y se hizo una estimación de la potencia de la vela. La potencia de la vela es la reducción neta observada en la salida del motor con la vela en unas condiciones determinadas de viento mientras se mantiene una velocidad de servicio constante.

De modo que se concluyó que dependiendo de la ruta que realizase un buque, se podría recuperar la inversión realizada en la instalación de este tipo de velas en un periodo comprendido entre 1,7 y 4,8 años.



**Figura 27: Potencia de la vela instalada en el buque Mini Lace.**<sup>64</sup>

<sup>63</sup> Fuente: *Sail assist developments 1979–1985* Lloyd Bergeson. Wind Ship Company, Norwell, MA., USA  
C. Kent Greenwald (Consultant & Formerly Chief Research Engineer) Wind Ship Company, USA.

<sup>64</sup> Fuente: *Sail assist developments 1979–1985* Lloyd Bergeson. Wind Ship Company, Norwell, MA., USA  
C. Kent Greenwald (Consultant & Formerly Chief Research Engineer) Wind Ship Company, USA.



### 6.1.2.1- Cruceros con velas convencionales Windstar.

Esta compañía de cruceros de lujo se estableció en 1984, y aún sigue operando con tres buques que disponen de generadores diesel eléctricos, propulsores eléctricos, y velas triangulares con el objetivo de auxiliar a la propulsión.

Según la información que proporcionan en su página web<sup>65</sup>, estos buques navegan a 10-12 nudos con la propulsión principal, y pueden llegar a alcanzar hasta los 15 nudos auxiliándose con las velas. Las velas están controladas por computadora, de modo que se hace más fácil el manejo de los aparejos, ya que todo el sistema está automatizado.

Como siempre, esta dualidad de propulsores supone que se pueden alcanzar mayores velocidades en condiciones favorables de viento, o bien se puede reducir el consumo de energía para la propulsión, resultando en un ahorro energético, y por tanto de emisiones.

En los meses de verano, la flota Windstar navega por las costas Mediterráneas y en los meses de invierno la compañía navega por la costa del Caribe y la costa del Pacífico de Costa Rica.

En el Anexo A se pueden ver las características de los 3 buques con los que opera la compañía de cruceros de lujo: “Wind Spirit”, “Wind Star” y “Wind Surf”.



**Figura 28: Buque Wind Surf asistido con velas convencionales.**<sup>66</sup>

<sup>65</sup> [www.windstarcruises.com/](http://www.windstarcruises.com/)

<sup>66</sup> Fuente: <http://www.windstarcruises.com/Yachts.aspx>

### 6.1.2.2.- Velas tipo ala Dynarig

Las velas DynaRig tienen su origen en el trabajo realizado en los años sesenta por Wilhelm Prolss, en la época que creía que el sistema podía proporcionar propulsión adicional para los buques. Estas velas son efectivamente unas velas cuadradas, el mástil se sostiene libremente, y las vergas<sup>67</sup> están conectadas rígidamente al mástil, en este caso cada mástil soporta 6 vergas.



**Figura 29: Buque Maltese Falcon con Dynarig<sup>68</sup>**

Actualmente existe un yate de lujo que es propulsado mediante este tipo de velas, con una superficie velica total de  $2400\text{ m}^2$ .

Las vergas, al contrario que un buque convencional con velas cuadradas, han sido construidas con una cámara del 12%. Las velas dispuestas entre las vergas de modo que cuando están desplegadas, no hay espacios en el plano vélico permitiendo a cada mástil con vela trabajar como una sola vela.

Cuando las velas no están desplegadas, se enrollan dentro de las vergas. Las velas se orientan en la dirección del viento rotando los mástiles. Como no hay aparejos, las vergas no tienen restricción en la rotación y esto es tomado junto con vergas de perfil curvado, una baja resistencia aerodinámica y una efectiva vela de piezas simples se combinan para dar al aparejo una mejorada eficiencia aerodinámica comparado con las velas cuadradas tradicionales.

Los mástiles tienen aproximadamente 58 metros de altura sobre el cojinete inferior. El concepto DynaRig tiene para una sección alargada para reducir el arrastre y esto requiere que la vela simétrica pueda ser dirigida para permitir el flujo en ambas direcciones.



**Figura 30: Diseño del buque Ecoline con velas cuadradas Dynarig.<sup>69</sup>**

<sup>67</sup> Piezas perpendiculares al mástil.

<sup>68</sup> Fuente: 'Maltese Falcon' Roddy Grimes Graem. <http://www.sail-world.com/Europe/Perini-Navi-Cup-victory-for-Maltese-Falcon/88096>

### 6.1.2.- Velas rígidas.

#### 6.1.2.1.- Velas cuadras.

La idea de aprovechar la fuerza del viento como propulsor auxiliar en buques a motor, fue presentada cuando los precios del crudo se dispararon en la crisis del petróleo de la década de los ochenta. Se instalaron velas cuadras rígidas en los buques y se confirmó la efectividad de las mismas en Japón.

En 1970 se le instalaron dos velas rígidas al petrolero Shin Aitoku Maru, que tenían un área total de  $200\text{ m}^2$  y estaban hechas de paneles metálicos desarrolladas por JAMDA. El buque tenía 66 metros de eslora entre perpendiculares y 26.000Tm de peso muerto. Este buque fue construido en la crisis del petróleo y sus dos velas tipo ala aumentaron la eficiencia en un 10%.



**Figura 31: Shin Aitoku Maru<sup>70</sup>, 1970.**



**Figura 32: Usuki Pioneer<sup>71</sup>.1985.**

En 1985 se le instalaron también dos velas cuadras rígidas con una superficie vélica total de  $640\text{ m}^2$  al granelero Usuki pioneer de 155 metros de eslora.

Más adelante, desde que el precio del crudo se desplomó, la ventaja de las velas decreció suponiendo unos mayores costes de producción, mantenimiento y operación de las velas rígidas. Ambas velas eran de tipo arco circular, y los buques a motor propulsados con ellas fueron examinados también en Dinamarca hace unos años<sup>72</sup>.

<sup>69</sup> Fuente: Dykstra Naval Architects Design: <http://www.fairtransport.eu/>

<sup>70</sup> Fuente: [http://moremhod.info/index.php?option=com\\_content&view=article&id=113:big-ships&catid=43:text&Itemid=30&limitstart=22](http://moremhod.info/index.php?option=com_content&view=article&id=113:big-ships&catid=43:text&Itemid=30&limitstart=22)

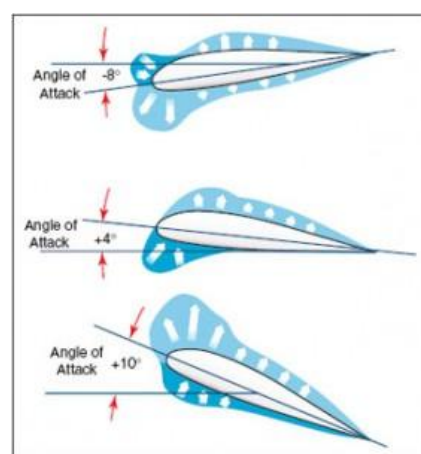
<sup>71</sup> Fuente: [http://moremhod.info/index.php?option=com\\_content&view=article&id=113:big-ships&catid=43:text&Itemid=30&limitstart=22](http://moremhod.info/index.php?option=com_content&view=article&id=113:big-ships&catid=43:text&Itemid=30&limitstart=22)

<sup>72</sup> Martin Rosander og Jens O.V. Bloch, Pelmatic Knud E. Hansen. "Modern Windships" 2000.

### 6.1.2.2.- Velas de perfil alar.<sup>73</sup>

Lo ideal en una vela rígida sería poder utilizar un perfil tipo NACA como los que vemos en las alas de los planeadores. Estos perfiles fueron creados por la National Advisory Committee for Aeronautics, la antigua NASA y generalmente vienen denominados por sus iniciales NACA seguido de cuatro dígitos que describen la forma del perfil. El primer dígito representa la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda (%c), el segundo dígito describe la distancia de la máxima curvatura desde el borde de ataque en 1/10 del porcentaje de la cuerda, y los dos últimos dígitos cuantifican el espesor como un porcentaje de la cuerda. También puede encontrarse información detallada sobre las características de los mismos en bases de datos.

El rendimiento de estos perfiles es mucho mayor, pero generalmente suelen ser asimétricos, debido a que están diseñados para aplicaciones aeronáuticas, de forma que al tratarse de vuelos, siempre reciben el viento por el mismo sentido y dirección, ya que trabajan en sentido horizontal y a elevadas velocidades. Pero el caso de propulsar un buque mediante perfiles aerodinámicos, supone empezar a trabajar en el plano vertical y a tener que orientarlos a las dos bandas, impidiéndose así la posibilidad del uso de perfiles asimétricos, salvo que siempre se navegase con el viento proveniente de una única banda.



**Figura 33: Presión sobre un ala en función del ángulo de ataque.<sup>74</sup>**

Por ello se ha sustituido el perfil ideal por un ala simétrica a la que le acompaña un alerón también simétrico que puede rotar sobre el borde de salida del ala y seguido de otro segundo alerón que a su vez rota sobre el extremo del primer alerón. Con este tipo de configuración, a igualdad de superficie de vela, estas consiguen una sustentación del doble de fuerza de lo que se puede conseguir con las mejores velas de regatas flexibles. Si en vez de 3 perfiles utilizamos uno de 6 perfiles encadenados la forma final es mucho más perfecta y se consiguen empujes 2,5 veces el de la mejor vela tradicional, aunque la necesidad de utilizar más perfiles y cables de control incrementa considerablemente la resistencia aerodinámica total del ala.

La idea es conseguir configurar la forma del perfil alar al inclinar estos alerones uno respecto a los otros. A su vez todo el conjunto puede rotar sobre el palo para conseguir modificar el ángulo de ataque al viento. De esta manera se puede modificar a voluntad la fuerza de sustentación y modificar libremente el ángulo de ataque hasta alcanzar el máximo rendimiento.

<sup>73</sup> Wingsails

<sup>74</sup> Fuente: <http://www.flightlearnings.com/2008/11/16/airfoil-design-part-3/>

A diferencia de las velas de siempre, al modificar un ajuste no se estropea el ajuste de los demás elementos del ala. Si por ejemplo modificamos el ángulo de ataque al hacer rotar el palo, la forma y perfil alar no se modifica. Así, es posible aplanar el ala con ángulo de ataque nulo para que el barco no avance y permanezca sin apenas resistencia al viento.

En las velas tradicionales el ajuste de cualquier elemento estropea de forma inmediata los demás ajustes de la vela. En cambio al manejar una vela rígida es mucho más sencillo de lo que a primera vista pudiera parecer. Cada ajuste afecta a su propia variable y no altera los demás ajustes.

La 33ª edición de la Copa América que se disputó el año 2010 pasará a la historia por la vela rígida<sup>75</sup> del BMW Oracle que con una altura de 57 metros, un peso de 3.500 kilos y una superficie de 650 metros cuadrados, proporcionó una mejora en el rendimiento y la maniobrabilidad del barco. La envergadura de esta vela rígida es un 80 por ciento más grande que el ala de una avión 747.

Al final el BMW Oracle Racing se hizo con el triunfo sin necesidad de disputar la tercera regata al vencer en las dos anteriores a su oponente, recuperando así el preciado trofeo para el país en el que nació la competición.



**Figura 34: BMW Oracle con vela tipo ala.<sup>76</sup>**

La reducida resistencia y el elevado rendimiento de estas velas con perfil alar, hacen que los barcos naveguen a una gran velocidad. La eliminación de la resistencia al viento en la jarcia elimina los sonidos típicos del viento de un velero tradicional.

Cuando este tipo de buques navega a toda velocidad, aumenta el viento relativo y por ello cambia la dirección del viento hacia la proa, sea cual sea el viento verdadero. Es de tal importancia este cambio de dirección debido al viento relativo, que al aumentar la velocidad del buque, un viento de través enseguida se hace tan de ceñida que sólo las velas rígidas e indeformables aguantan su forma y por tanto mantienen la sustentación que les proporciona su potencia. En una vela normal a medida que aumenta el viento relativo y este también se hace más de proa, por lo que la curvatura de la misma se hace inestable y la vela pierde su forma alar y por tanto su rendimiento.

Para reducir la potencia en un ala rígida, basta con modificar la forma del perfil y el ángulo de ataque con el viento. Incluso es posible dejar la vela con sustentación nula sin aumentar la resistencia aerodinámica, aplanando el perfil en los alerones de la parte superior

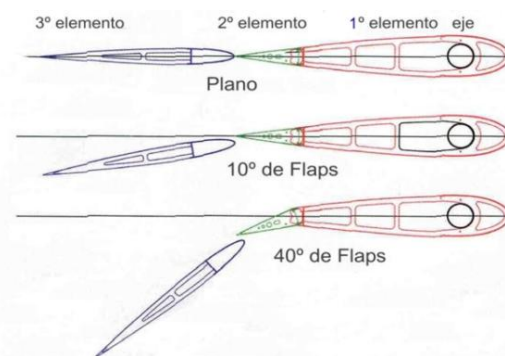
<sup>75</sup> Wingsail

<sup>76</sup> Fuente: <http://www.liveyachting.com/bmw-oracle-wins-33rd-america's-cup-first-race>



de la vela para que la potencia se produzca sólo en la parte inferior del ala y por tanto se disponga de potencia pero con un muy reducido momento de escora.

Estas velas pueden tener dos o hasta seis elementos, pero como siguen la misma norma solo comentaremos una vela de tres elementos. El ajuste del ángulo entre estos elementos es lo que permite definir la forma final del perfil alar. El primer elemento está sólidamente unido al eje vertical formado por una estructura en fibra de carbono. Este es el primer ajuste angular que hace pivotar toda el ala sobre el eje alojado en la cubierta. En los primeros diseños de alas, el eje se encontraba demasiado retrasado respecto al centro de empuje, haciendo el conjunto demasiado neutro, como si se tratara de un timón muy compensado, y por tanto demasiado blando. Los nuevos diseños tiene el eje de giro mucho más adelantado lo cual permite una gran reacción del conjunto y por tanto más eficacia en los ajustes del ala.



**Figura 35: Elementos que forman la vela tipo ala.<sup>77</sup>**

En el borde de salida de este primer elemento se encuentra el primer flap similar al de cualquier avión. Y en el borde de salida de este segundo elemento se encuentra el tercer elemento a modo de segunda ala, de modo que el segundo elemento es una extensión del primer elemento, mientras que el tercer elemento es un foil que trabaja de forma independiente pero en conjunción con los elementos 1 y 2. El foil tiene un perfil simétrico NACA de tipo 0009 desde el que salen unas líneas de control para pivotar el segundo elemento, y otras para controlar el tercer elemento. Finalmente todo el conjunto puede rotar sin alterar el perfil alar definido, para ajustarse al ángulo con que nos ataca el viento relativo.

El juego consiste en ajustar el foil y el flap para conseguir el mayor empuje y la menor resistencia aerodinámica del perfil alar conseguido. Con vientos de popa, se trata de mantener un flujo de viento continuo con una fuerte deflexión del flap mientras se logra una ranura entre el flap y el foil.

En definitiva se controlan dos variables, en una primera línea de control que ajustará el ángulo de giro de todo el conjunto alar. Una segunda línea permite ajustar el ángulo del flap respecto al ala en un ángulo máximo de 15 grados a ambos lados. La tercera y cuarta línea permiten ajustar el ángulo del foil en la parte baja del ala y en la parte alta del ala y se pueden utilizar de forma conjunta o separada.

De hecho con vientos muy fuertes se podría llegar a crear sustentación positiva en la parte inferior para empujar sin generar demasiado par de escora y algo de sustentación negativa en la parte superior del ala que nos ayudara a disminuir la escora del barco.

<sup>77</sup> Fuente: [http://www.fondear.org/infonautic/barco/Velas\\_Aparejos/Velas-Alas-Rigidas/Velas-Alas-Rigidas.asp](http://www.fondear.org/infonautic/barco/Velas_Aparejos/Velas-Alas-Rigidas/Velas-Alas-Rigidas.asp)

Existe una última línea de control que permite ajustar la separación entre el segundo y tercer elemento para aumentar o disminuir el efecto canal entre estas dos secciones.

Existen diversas configuraciones de velas tipo ala, y son numerosos los inventos que han ido surgiendo a lo largo de la historia, pero lo que realmente distingue a unas velas de otras, son los coeficientes de sustentación y de resistencia aerodinámica a los que están sujetos. A medida que han pasado los años, se han ido obteniendo perfiles y tecnologías que permitían mayores sustentaciones con menores resistencias aerodinámicas, lo que ha resultado en una mayor eficiencia aerodinámica.

Una versión de 8 toneladas de la vela tipo ala Walker<sup>78</sup>, fue evaluada en 1986-1988 a bordo del pequeño buque comercial M/V Ashington. Debido a los reducidos costes del combustible de la época, la firma que operaba el buque decidió que la vela no cumplía su criterio de amortización. El colapso de los precios del crudo hicieron económicamente inviable el caso del uso de velas tipo ala en el transporte marítimo comercial y la compañía se dirigió a los mercados de yates de lujo y lanzó el trimarán Blue Nova en 1990 y un diseño menor de trimarán de 43 pies Zefyr del cual se produjeron 4 entre 1997-2001.

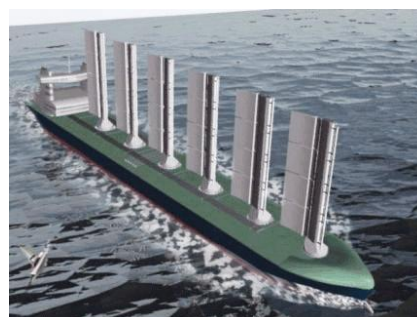


**Figura 36: M/V Ashington<sup>79</sup>**



**Figura 37: Blue Nova<sup>80</sup>**

El año 1992, el Ministerio de Medio Ambiente y Energía de Dinamarca financió un estudio a la Consultora de Arquitectos Navales e Ingenieros Navales Knud E. Hansen A/S para explorar las posibilidades de un buque comercial asistido por velas. En respuesta, la firma desarrolló entre 1995 y 1997 un concepto llamado Modern Windship, para un carguero de 200 metros y 50.000 toneladas asistido por viento.<sup>81</sup>



**Figura 38: Modern Windship. 1999.<sup>82</sup>**

<sup>78</sup> Walker Wingsail.

<sup>79</sup> Fuente: 'Wingsail' ready for small commercial vessels.. Maritime Journal. 29 Mayo 2008 [http://www.maritimejournal.com/features101/power-and-propulsion/wingsail\\_ready\\_for\\_small\\_commercial\\_vessels](http://www.maritimejournal.com/features101/power-and-propulsion/wingsail_ready_for_small_commercial_vessels)

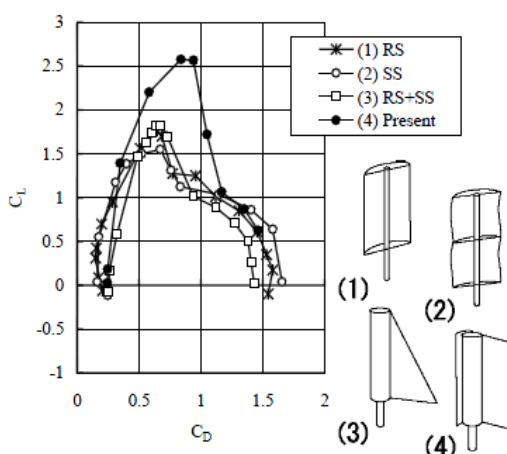
<sup>80</sup> Fuente: <http://www.planesail.com/>

<sup>81</sup> Modern Windships, Martin Rosander og Jens O.V. Bloch, Pelmatic Knud E. Hansen. Copenhagen, December 1999.

<sup>82</sup> Fuente: Navy Ship Propulsion Technologies: Options for Reducing Oil Use -- Background for Congress

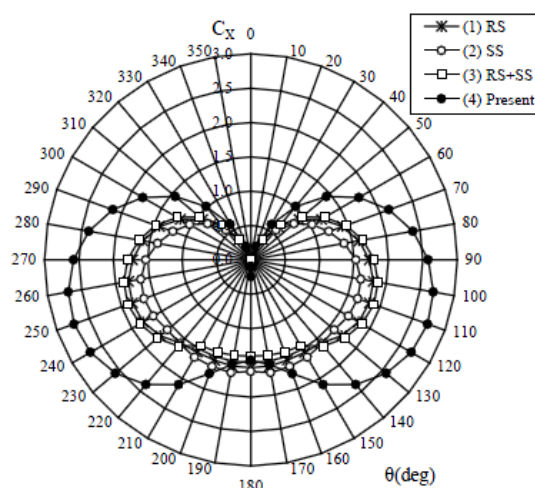
En el año 2003 continuó el interés en los investigadores marítimos en Japón, en el desarrollo de buques comerciales de navegación oceánica con velas híbridas de alto rendimiento similares a las de Windship<sup>83</sup>. Se llevaron a cabo experimentos en el túnel de viento en su instituto de investigación para analizar las características aerodinámicas de las velas. Todos los experimentos se realizaron con velocidades del viento de 8m/s, con una vela rígida tipo NACA0030, que tenía 1 metro de alto y 0,11 de ancho. La fuerza de empuje resultante fue representada principalmente mediante sus coeficientes de sustentación y de resistencia aerodinámica máximos.

Una vez obtenidos los resultados, se compararon con los parámetros aerodinámicos las velas propuestas anteriormente por Ishihara en 1980, y se representaron gráficamente, tal como se muestra en la siguiente figura, en la que viene representada la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de resistencia aerodinámica de los diferentes perfiles de las velas rígidas y blandas que se muestran a continuación. Como puede observarse, el perfil número 4 presenta un mayor coeficiente de sustentación que los demás perfiles para los valores comprendidos entre 0,5 y 1 del coeficiente de resistencia aerodinámica.



**Figura 39: Curva CL/CD de los diferentes perfiles.**<sup>84</sup>

Otro resultado interesante de las pruebas en túnel de viento, es el diagrama polar en el que se representa el coeficiente de empuje longitudinal de cada una de los perfiles en función del ángulo de procedencia del viento aparente. Este diagrama permite una visión general de la fuerza resultante de las diferentes velas, donde se comparan las velas rígidas RS, las convencionales SS, las mixtas y la presente. Con este diagrama se puede observar perfectamente como de forma general, las velas tan sólo son efectivas con vientos aparentes que provengan a partir de los 50-60 grados desde la proa hacia ambas bandas.



**Figura 40: Diagrama Polar del Cx de diversos sistemas.**<sup>85</sup>

Congressional Research Service Report for Congress Ronald O'Rourke. 2 Junio 2006,

<sup>83</sup> "On Aerodynamic Characteristics of a Hybrid-Sail with Square Soft Sail". Toshifumi Fujiwara, Koichi Hirata, Michio Ueno and Tadashi Nimura et al, National Maritime Research Institute, Tokyo, Japan.

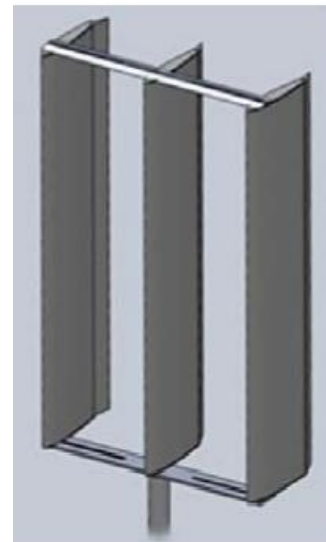
<sup>84</sup> Fuente: "On Aerodynamic Characteristics of a Hybrid-Sail with Square Soft Sail". Toshifumi Fujiwara, Koichi Hirata, Michio Ueno and Tadashi Nimura et al, National Maritime Research Institute, Tokyo, Japan.



El año 2010, se presentó en la Universidad de Southampton, un proyecto<sup>86</sup> en el que se desarrollaba un buque de cabotaje portacontenedores rápido y sostenible ambientalmente, que podía alcanzar una velocidad operacional máxima de 25 nudos, para la implementación de sistemas multi-alas en el año 2020 para los buques portacontenedores de cabotaje que realicen las rutas del Sur Este Asiático y del Caribe.

El uso de combustibles bajos en carbono y sin azufre (LNG) y las mejoras en la eficiencia operacional media predicen que los gases de efecto invernadero pueden ser reducidos hasta un 42% y 40% en las dos regiones seleccionadas.

La adopción de un sistema de velas multi-alas reduce los requerimientos de energía hasta un 6% en buques que navegan a 15 nudos. Mientras que el beneficio propulsivo es menor de lo que inicialmente se esperaba, el efecto adicional de la amortiguación del movimiento por parte de la vela puede ser significativo. Se han predicho ahorros de costes diarios con respecto a los típicos buques existentes del 27% y del 33% en las regiones del sureste Asiático y el Caribe respectivamente, haciendo el concepto económica y ambientalmente viable.



**Figura 41: Sistema Multi-alas<sup>87</sup>**

Después de la revisión de diversos sistemas existentes, el equipo de investigación decidió elegir el sistema multi-alas Walker debido a su mayor eficiencia aerodinámica. El sistema consiste en tres alas rígidas con una gran relación de aspecto, que puede ser plegado en tormentas y durante el manejo de la carga. Un sistema está colocado en la mitad del buque y otro a popa.

Se halló que una sección de ala tipo NACA0015 con un flap en el 80% de la cuerda de los perfiles, proporcionaría el mejor rendimiento aerodinámico para navegaciones en contra del viento. Las dimensiones y la relación de aspecto fueron determinadas considerando las limitaciones dimensionales para la estiba entre los contenedores superiores.

<b>Tabla 3: Características del sistema multi-alas<sup>88</sup></b>	
Nº de sistemas	2
Altura (m)	26,50
Envergadura del ala (m)	25,00
Cuerda (m)	6,25
Relación de aspecto	4,00
Superficie velica total	937,50
Anchura (m)	13,86
Masa (Tm)	10,00

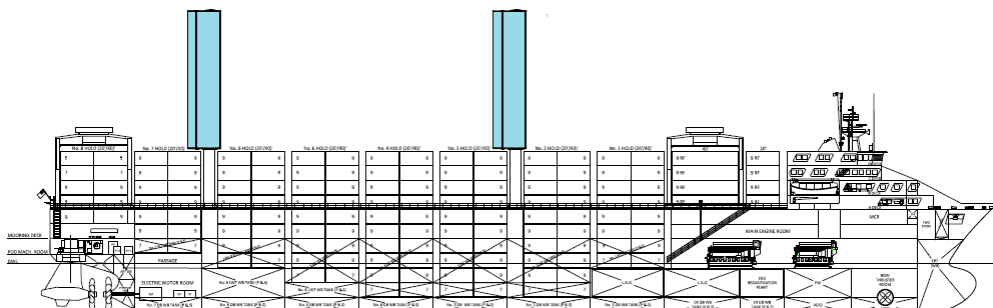
<sup>85</sup> Fuente: "On Aerodynamic Characteristics of a Hybrid-Sail with Square Soft Sail". Toshifumi Fujiwara, Koichi Hirata, Michio Ueno and Tadashi Nimura et al, National Maritime Research Institute, Tokyo, Japan.

<sup>86</sup> Fuente: "Concept Design of a Fast Sail Assisted Feeder Container Ship" Aaron Burden, Thomas Lloyd, Simon Mockler, Lorenzo Mortola, le Bum Shin, Ben Smith. University of Southampton. 2009/2010.

<sup>87</sup> Fuente: "Concept Design of a Fast Sail Assisted Feeder Container Ship" Aaron Burden, Thomas Lloyd, Simon Mockler, Lorenzo Mortola, le Bum Shin, Ben Smith. University of Southampton. 2009/2010.

<sup>88</sup> Fuente: "Concept Design of a Fast Sail Assisted Feeder Container Ship" Aaron Burden, Thomas Lloyd, Simon Mockler, Lorenzo Mortola, le Bum Shin, Ben Smith. University of Southampton. 2009/2010.

Se realizaron pruebas de túnel de viento utilizando modelos a escala 1:15 para determinar el rendimiento global del sistema, investigando el efecto la separación entre las alas, su distribución y las interacciones con los contenedores. A medida que el espacio entre las alas decrece, también lo hacen la sustentación y el arrastre inducidos. Basándose en los coeficientes aerodinámicos del sistema, se ha predicho una reducción de empuje de un 10% a velocidades de 15 nudos y de un 3% a velocidades de 25 nudos.



**Figura 42: Sistema multi-alas en un buque porta-contenedores de cabotaje.<sup>89</sup>**

#### 6.1.2.2.- Velas de semi luna.

En el año 2009 Ouchi y Uzawa de la Universidad de Tokyo propusieron un diseño conceptual de un buque propulsado por el viento y asistido por motor, que tiene instalado hasta nueve velas rígidas<sup>90</sup>. La cascada de velas rígidas fue diseñada como propulsor principal del buque y se debatió sobre esta tecnología para aplicarla en un granelero y en un buque tanque. Por ejemplo, evaluaron que un bulk carrier tipo cape size con una velocidad de diseño de 15 nudos, podría obtener bastante empuje de las nueve velas rígidas bajo vientos de 15 m/s y en condiciones de viento de través.



**Figura 43: Buque propulsado con 9 velas rígidas tipo ala.<sup>91</sup>**

<sup>89</sup> Fuente: "Concept Design of a Fast Sail Assisted Feeder Container Ship" Aaron Burden, Thomas Lloyd, Simon Mockler, Lorenzo Mortola, le Bum Shin, Ben Smith. University of Southampton. 2009/2010.

<sup>90</sup> Fuente: "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel" Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa and Akihiro Kanai, University of Tokyo, Japan.

<sup>91</sup> Fuente: "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel." Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa. Graduate School of Engineering. The university of Tokyo. Japan.

Sin embargo, las velas tipo ala están situadas en un espacio limitado de cubierta y deben de estar instaladas cerca las unas de las otras. Por eso, este tipo de velas pueden interactuar aerodinámicamente las unas con las otras, de modo que la interacción fue considerada en una predicción de rendimiento sobre la cascada de velas rígidas.

Las características aerodinámicas de una combinación de velas ya habían sido investigadas en diversos estudios, como los realizados por Ingham y Terslov<sup>92</sup> en 1985 en el que hicieron un experimento mediante túnel de viento, analizando el rendimiento aerodinámico de una cascada de velas sujetas a un granelero. Tres años más tarde, Amemiya y Ohsugi<sup>93</sup> también estudiaron el rendimiento de las velas cuadras del buque tradicional Nippon Maru.

Sin embargo, la mayor parte solo se centraron en el rendimiento de la propulsión total, y solo hay unos pocos ejemplos que enfoquen el fenómeno de la interacción aerodinámica entre diversas velas tipo ala. Por ejemplo el estudio realizado por Fujiwara, Hern, Kitamura y Ueno en el año 2005<sup>94</sup> o el llevado a cabo por Vincent, Romaric, Guillaume y Patrick en el año 2006<sup>95</sup>.

En este estudio llevado a cabo en 2006 por Ouchi y Uzawa, se investigó el fenómeno de interacción entre cada vela mediante la mejora del rendimiento aerodinámico del buque propulsado por viento. Con el fin de aclarar el fenómeno aerodinámico alrededor de una cascada de velas tipo ala, se extrajeron dos o tres velas del objeto y se investigaron con medidas de las pruebas de túnel de viento y simulación numérica.

Se investigó la interacción aerodinámica entre cada vela en la cascada de tres velas con el mismo ángulo de ataque. Los mecanismos de la interacción fueron debatidos por una visualización numérica. El uso efectivo de la interacción también se investigó en una cascada de dos velas con ángulos de ataque independientes.

---

<sup>92</sup> "Wind tunnel tests and manoeuvre simulator tests with different types of sails and ships" Ingham, P. and Tersløv O. (July 1985). Japan Institute of Navigation.

<sup>93</sup> "The Experiments on the Sailing Performance of the Sail Training Ship Nippon Maru" Isaku AMEMIYA & Isamu OHSUGI. Japan Institute of Navigation.

<sup>94</sup> "Sail-sail and sail-hull interaction effects of hybrid-sail assisted bulk carrier" Journal of Marine Science and Technology June 2005, Volume 10, Issue 2, pp 82-95. Toshifumi Fujiwara, Grant E. Hearn, Fumitoshi Kitamura, Michio Ueno

<sup>95</sup> "Analysis, Design and Optimization of Navier-Stokes Flows around Interacting Sails" Vincent G. Chapin, Romaric Neyhousser, Guillaume Dulliand, Patrick Chassaing. MDY06 International Symposium on Yacht Design and Production. March 2006.

En concreto hay un estudio<sup>96</sup> que analiza la aplicación de unas velas con forma de media luna en un buque granelero convencional de 300 metros de eslora. El buque mercante propulsado por viento supera el 50% de reducción de combustible. Por ejemplo las principales características de un bulk-carrier tipo capesize son:

<b>Tabla 4: Características del granelero propuesto para cascada de velas.</b>	
Eslora	300 m
Manga	50 m
Puntal	25 m
Calado	16 m
Peso Muerto	180.000 Tm
Superficie Vélica	9.000 $m^2$
Maquina Auxiliar	12.000 kW
Velocidad de Servicio	14 nudos
Dotación Completa	25 Personas



**Figura 44: Buque con 9 velas rígidas tipo ala plegadas en puerto.<sup>97</sup>**

En el caso del granelero tipo mostrado en la tabla 4, y considerando una superficie de 1000  $m^2$  por cada vela, y un coeficiente de empuje con valor de 1,5 desde los 45º por estribor hasta los 45º por babor, y a partir de la ecuación anterior se calcula el empuje de cada una de las velas (FL) y el empuje total de las nueve velas propuestas (FLt) que actúa sobre el buque.

En la tabla 5 se representa la potencia efectiva<sup>98</sup>, la potencia en el freno<sup>99</sup>, la velocidad del buque y el número Froude correspondiente al empuje total, considerando rendimientos propulsivos generales de los típicos graneleros cape-size existentes en el mercado de transporte marítimo.

<sup>96</sup> Fuente: "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel." Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa. Graduate School of Engineering. The university of Tokyo. Japan. June 2011.

<sup>97</sup> Fuente: "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel." Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa. Graduate School of Engineering. The university of Tokyo. Japan. June 2011.

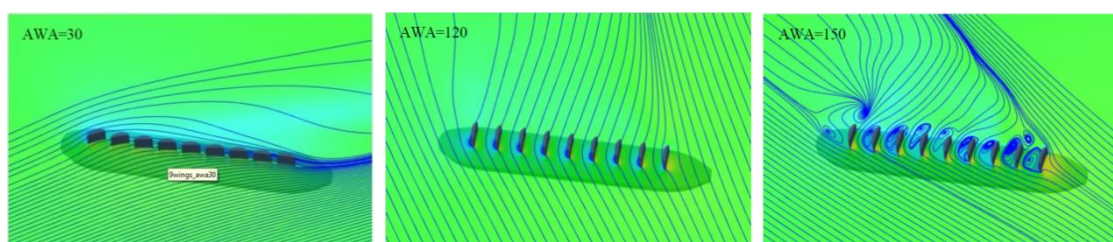
<sup>98</sup> Potencia requerida para desplazar el casco del buque a una velocidad determinada en ausencia de la acción del propulsor.(EHP)

<sup>99</sup> Potencia producida por el propulsor principal. (BHP)

<b>Tabla 5: Estimación del empuje proporcionado por la cascada de velas propuesta.</b>						
$V_A$	FL	$FL_t$	EHP	BHP	$F_n$	$V_B$
4.0	1,500	13,500	334	463	0.047	4.9
6.0	3,375	30,375	1,126	1,564	0.070	7.4
8.0	6,000	54,000	2,669	3,707	0.093	9.8
10.0	9,375	84,375	5,213	7,241	0.116	12.3
12.0	13,500	121,500	9,008	12,512	0.140	14.7
14.0	18,375	165,375	14,305	19,868	0.163	17.2
16.0	24,000	216,000	21,353	29,657	0.186	19.6

A partir de esta estimación se obtuvo que con un viento aparente de 12 m/s, el buque podría ser propulsado a 14 nudos sin necesidad de maquinaria propulsora. Sin embargo, la asistencia de la máquina principal para la propulsión, se vuelve necesaria cuando se considera la variabilidad del viento.

Este equipo realizó una predicción del rendimiento mediante simulaciones de mecánica de fluidos computacional<sup>100</sup> para predecir las fuerzas aerodinámicas generadas por las nueve velas tipo ala de tamaño natural.<sup>101</sup> El modelo en 3 dimensiones que emplearon para llevar a cabo las simulaciones es el que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 45: Líneas de flujo y presiones de contorno de las velas rígidas.**<sup>102</sup>

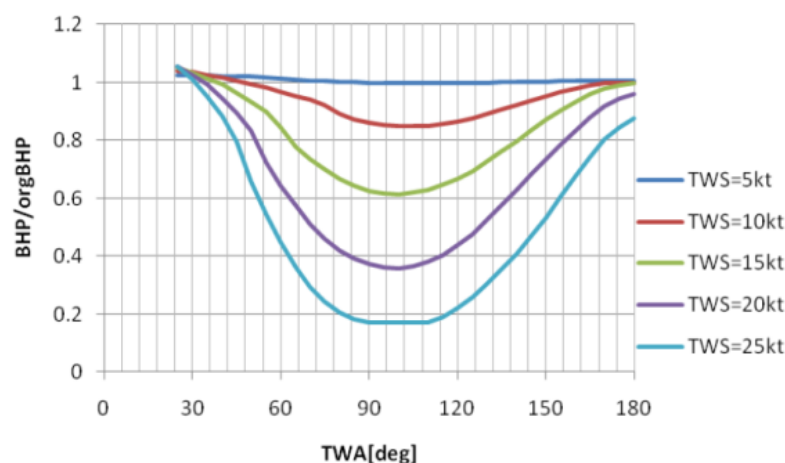
En estas simulaciones fueron variando el ángulo del viento aparente desde los 30° hasta los 165° por la proa, para visualizar el flujo del viento alrededor de las nueve velas tipo ala y las presiones en cada punto de las mismas, de modo que se determinaron las fuerzas de empuje longitudinal, transversal y el momento alrededor de un eje vertical en cada una de las velas y se emplearon como modelo de velas para la predicción del rendimiento del buque.

Al comparar la potencia al freno de un granelero convencional original y las del mismo granelero con velas rígidas se obtuvo que se podía reducir el consumo energético más de un 50% con ayuda del sistema de propulsión de velas rígidas de perfil alar.

<sup>100</sup> Dinámica de fluidos Computacional (CFD).

<sup>101</sup> Kanai et al 2011

<sup>102</sup> Fuente: "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel." Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa. Graduate School of Engineering. The university of Tokyo. Japan. June 2011.



**Figura 46: Relación entre la potencia en el freno de buque convencional y buque con cascada de alas, en función del ángulo del viento verdadero.**<sup>103</sup>

Se consideró que los  $1000 \text{ m}^2$  de la vela rígida fueran hechos de CFRP, un avanzado material compuesto del carbono, debido a su ligereza y su excelente resistencia. No obstante, el mástil telescópico deslizante se concluyó que podría ser construido de acero de alta resistencia debido a que el precio de CFRP compuesto es muy elevado. Se confirmó que las velas rígidas de esta construcción pueden soportar una resistencia aerodinámica de hasta  $800 \text{ kN}$  ( $0,8 \text{ kN/m}^2$ ) en el caso de vientos de  $30 \text{ m/s}$  en dirección normal a la cuerda de las alas. El peso total del mástil y las velas se estima que sería aproximadamente de 100 toneladas.

Este diseño con velas rígidas retráctiles, se vuelve muy interesante a la hora de contrarrestar los elevados momentos escorantes que se derivan del uso de este tipo de sistemas. Con esta solución, se puede llegar a modificar la altura del centro de presiones de la superficie expuesta al viento, de forma que en caso de encontrarse en vientos fuertes, puede llegar a modificarse la altura de las velas, la superficie y la distancia al centro de gravedad del buque, evitando así las indeseadas escoras que implican estos sistemas.

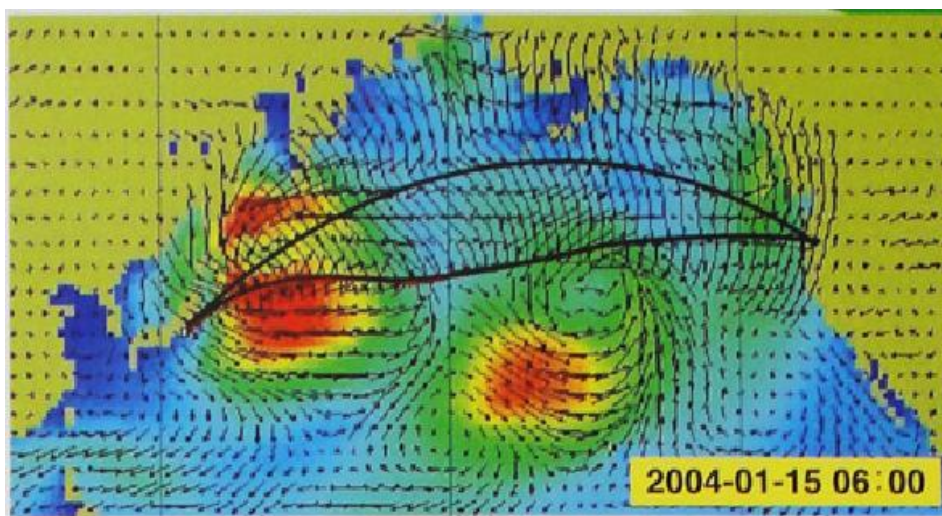
El Profesor Uzawa Kiyoshi mostró un modelo del UT Wind Challenger en la feria de comercio en Tokyo a finales del mes de abril del 2012, con particular atención en las grandes velas telescópicas. De acuerdo con el Profesor Uzawa, los costes de combustible pueden reducirse hasta en un tercio, asumiendo un ahorro de combustible de un 25%, el coste de cada vela del UT WindChallenger es de 2,5 millones de dólares y sería amortizado en 5-10 años. El profesor planea construir un prototipo de tamaño medio, y empezar pruebas de mar prácticas durante un par de años. La Universidad de Tokyo quiere tener una embarcación funcionando con este sistema para el 2016.

<sup>103</sup> Fuente: "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel." Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa. Graduate School of Engineering. The university of Tokyo. Japan. June 2011.



Para presentar el sistema muestran las diversas rutas y modos de viaje, para realizar un viaje desde Yokohama hasta Seattle:

- 1.- Una ruta ortodrómica con velocidad del buque constante supone un 22% de reducción del consumo de combustible.
- 2.- Una ruta ortodrómica con la potencia de la máquina propulsora principal constante supone también un 22% de reducción del consumo de combustible.
- 3.- Una ruta optimizada con potencia de la máquina constante supone 30% de reducción del consumo de combustible.



**Figura 47: Ruta Ortodrómica y Ruta óptima.**<sup>104</sup>

Como se puede observar en las gráficas del Anexo C, el operador del buque puede decidir la forma en la que quiere realizar el viaje, de modo que puede elegir entre mantener la velocidad del buque constante, o bien potencia constante teniendo la opción de poder realizar una ruta más corta, o una ruta optimizada para su propósito.

#### **6.1.2.3.- Las Velas Solares**

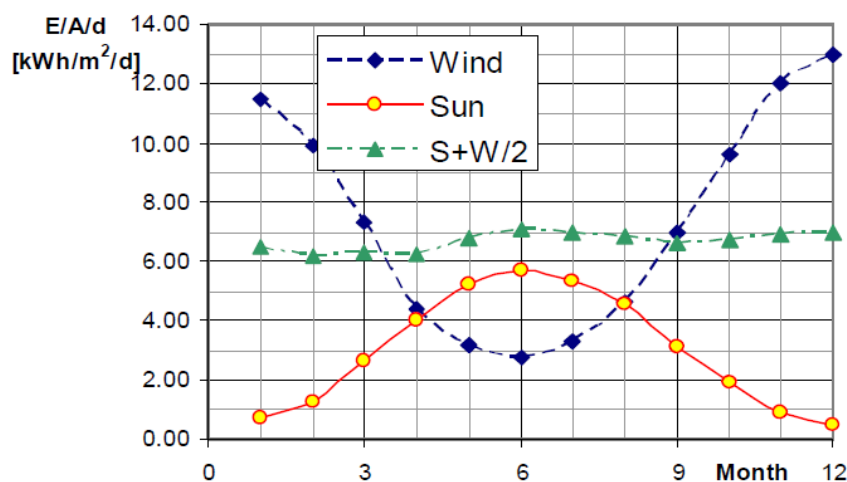
El transporte marítimo, debido a su improbable baja demanda de energía y al entorno en el que se ve envuelto durante su operativa, ofrece la oportunidad de obtener un elevado ritmo de abastecimiento energético mediante las fuentes energéticas de baja densidad como el flujo del viento y la radiación solar. Una correcta combinación de propulsión a viento con energía solar y un sistema de gestión energética inteligente a bordo, podrían liderar, paso a paso, hacia un futuro sistema de operación de buques con ausencia total de combustión de combustibles fósiles y por tanto, de emisiones.

La combinación local de energía solar y del viento es soportada también por la correlación negativa de las inmisiones. En latitudes moderadas está claro que el máximo solar

<sup>104</sup> Fuente: Next generation cargo ship with 50m high sails uses 30% less fuel - 24 Abril 2012.

<http://www.diginfo.tv/v/12-0066-r-en.php>

se produce en verano, mientras que el viento es máximo en invierno. Una correlación similar sostiene en el tiempo a corto plazo entre periodos de alta y baja presión, por lo que la suma de las entradas energéticas del viento y del sol es significativamente menos variable que cualquiera de los componentes.



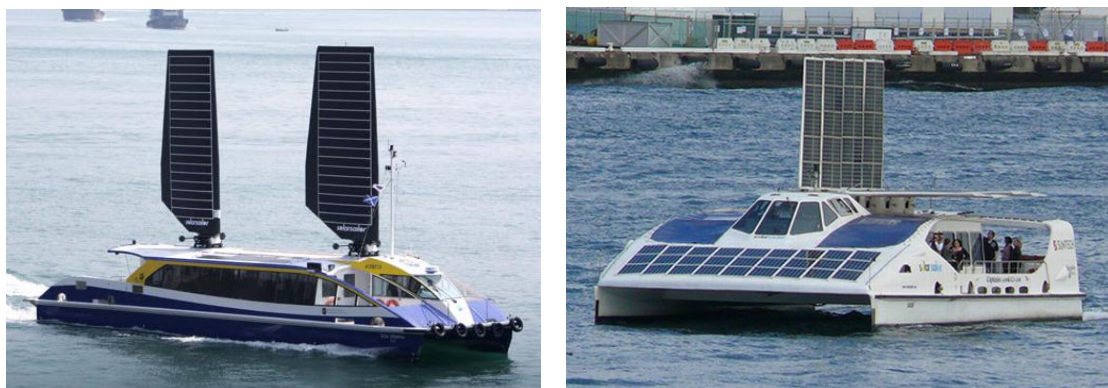
**Figura 48: Variación estacional de la energía media diaria en el Mar del Norte.**<sup>105</sup>

Esto no puede reemplazar nuestro presente abuso energético a partir del combustible fósil barato, pero puede ser suplementado por un incremento de la eficiencia de aplicación y una gestión inteligente de la energía. Esto incluiría utilizar herramientas avanzadas de gestión para desarrollar rutas meteorológicas óptimas, para establecer velocidades de servicio estacionales y dependientes de las condiciones meteorológicas.

La compañía Solar Sailor ha patentado unas velas que aprovechan la energía del sol y del viento. Estas velas se han instalado en el buque "Solar Albatros". Este es el primer buque comercial híbrido propulsado por combustible fósil, energía almacenada, del viento y solar, en el que esta tecnología ha sido probada. Este buque es un ferry catamaran de 24 metros de eslora, capaz de transportar 100 pasajeros. De acuerdo con la compañía, en las primeras pruebas cuando navegaban en vientos verdaderos de 15 nudos de intensidad y de 45 grados desde la proa, la velocidad del buque aumentaba al menos 2 nudos con la misma potencia de la máquina.

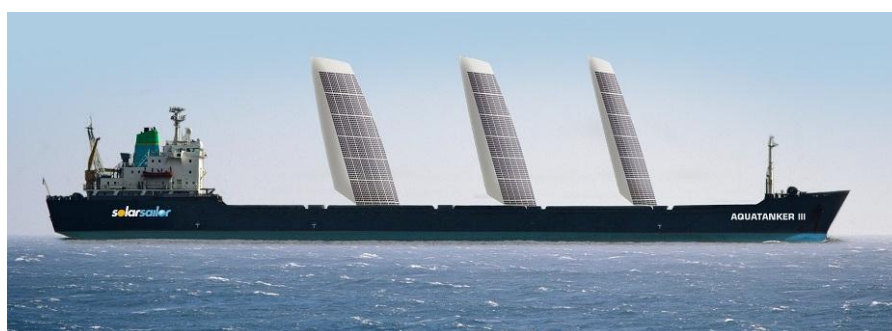
<sup>105</sup> Fuente: "Wind Propulsión for Solar Ship Operation" Peter Schenzle. Hamburg. Germany.





**Figura 49: Buque Solar Albatros y Solar Wing con velas solares.<sup>106</sup>**

Esta compañía también ha diseñado velas solares de  $800\text{ m}^2$  que pueden ser instaladas a bordo de buques comerciales. Éstas se concibieron para transportar agua desde Kimberly hasta Perth.<sup>107</sup> En el año 2012 está realizando un estudio de viabilidad, en conjunción con la industria, para analizar los potenciales ahorros de combustible disponibles en las rutas de transporte a granel utilizando energía del viento y solar.



**Figura 50: Buque Aquatanker III con velas solares.<sup>108</sup>**

Las estimaciones actuales predicen una retribución de la inversión a partir de los ahorros de combustible en 2-3 años con un buque navegando a 16 nudos entre los puertos de los hemisferios norte y sur. Los ahorros provienen de la energía del viento complementando a la propulsión principal y la energía del sol contribuyendo al abastecimiento de la línea eléctrica principal. Los resultados preliminares del estudio estarán disponibles en junio de 2012.

<sup>106</sup> Fuente: "Llega la propulsión híbrida a los viajes por mar". NewsNauticweb.com. Solar Albatros. <http://es.nauticwebnews.com/499/llega-la-propulsion-hibrida-a-los-viajes-por-mar/>

Solar Sailor: Solar-Powered super yacht blends luxury with green! Solar Sailor. <http://trendsupdates.com/solar-sailor-solar-powered-super-yacht-blends-luxury-with-green/>

<sup>107</sup> <http://www.solarsailor.com/hmp-solutions/large-shipping/>

<sup>108</sup> Fuente: Solar Sailor. <http://www.solarsailor.com/hmp-solutions/large-shipping/>

#### 6.1.2.4.- Velas Estructurales

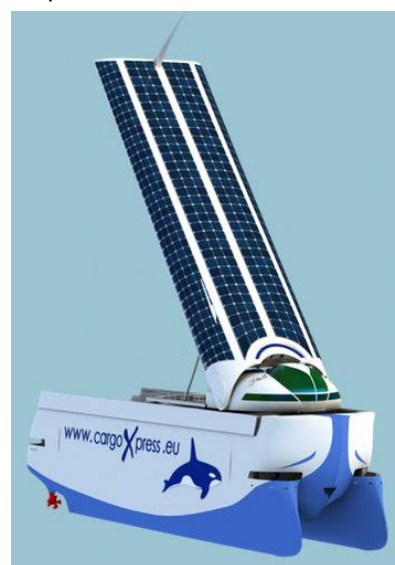
El proyecto de I+D+i “EU-CargoXpress”<sup>109</sup> del 7º programa de la Comisión Europea ha investigado un concepto prometedor de un buque portacontenedores patentado, con sus propios medios de carga y un consumo de combustible muy bajo, gracias a una vela estructural. Han estudiado la posibilidad de diseñar un modelo en el que las tapas de escotillas sean además una vela estructural que puede ser empleada como grúa para cargar y descargar los contenedores. Ha contado con la participación de 12 socios de 5 países, representando universidades y centros tecnológicos, ingenierías, sociedades de clasificación, navieras, puertos y astilleros.



Este Proyecto de la Unión Europea no sirve para cubrir las relaciones específicas entre dos puertos, como en un proyecto de diseño de un buque convencional. Esto apunta a la creación de un buque estándar para el transporte costero y fluvial, para la futura logística marítima. Después del estudiar 1200 puertos en Europa y África, el equipo decidió crear un perfil de operación estándar para objetivos científicos.

El modelo estándar está basado en un "feeder" y la operación general de carga entre dos grandes terminales separadas 1000 millas náuticas, sirviendo entre las dos terminales a 9 pequeños puertos con contenedores. En un segundo paso, comparamos un "feeder" corriente (con comparable Resistencia Hidrodinámica) con el nuevo buque, sirviendo dos puertos por día, separados 100 mn. Tendrá una eslora de 85m aproximadamente y un desplazamiento de 1600Tm.

Durante el proyecto se han construido a escala y ensayado 3 modelos del casco y una vela, así como un módulo del casco a escala real, investigando el uso complementario de la energía eólica y solar para reducir el consumo de energía fósil y las emisiones, además del empleo de materiales compuestos y aluminio para aligerar su peso. Incorpora también una grúa a bordo y puente móvil para dar servicio en puertos pequeños con un buque de estas características y capacidad para 200 TEU equivalente a 100 camiones.



**Figura 51: Buque CargoXpress con vela estructural solar.**<sup>110</sup>

Las conclusiones del proyecto fueron publicadas el 30 de Marzo de 2012.

<sup>109</sup> <http://www.cargoxpress.eu/espanol/>

<sup>110</sup> Fuente: <http://www.cargoxpress.eu/espanol/>

Tras 32 meses de investigación, el proyecto I+D+i "EU-CargoXpress" aporta el diseño de un buque sostenible de carga que incorpora el uso complementario de energías renovables y reduce más de un 50 por ciento el consumo de energía fósil y las emisiones. Los resultados del proyecto, dirigido por Volker H. Rosenkranz y que ha coordinado ACCIONA Trasmediterránea, se acaban de presentar en un encuentro con la mar del Clúster Marítimo Español celebrado en la E.T.S. de Ingenieros Navales de Madrid.

Las ventajas de este sistema son las siguientes:

- La forma optimizada de los flotadores muestra muy poca resistencia en los test y, por lo tanto necesita poca potencia del motor.
- La grúa STS a bordo del buque permite estancias en puerto más cortas y reducir la velocidad de viaje entre puertos sin que se produzca demora, como en los buques actuales.
- La vela añade 700kW en el 46% de los viajes, reduciendo considerablemente el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- El gran pack de baterías permite acceder a puerto y maniobrar sin el motor principal y sirve como un apoyo auxiliar.
- El nuevo concepto ha comprobado resultados que ahorran más del 60% de combustible y CO<sub>2</sub> y funciona sólo el 36% del tiempo con los tradicionales y poco eficaces motores de pistones.

En el Anexo D se muestran las especificaciones del buque CargoXpress con vela estructural propuesto, junto con unos escenarios energéticos en los que se compara el consumo y la fuente energética con un buque tradicional tipo feeder con propulsión mediante eje principal y timón.

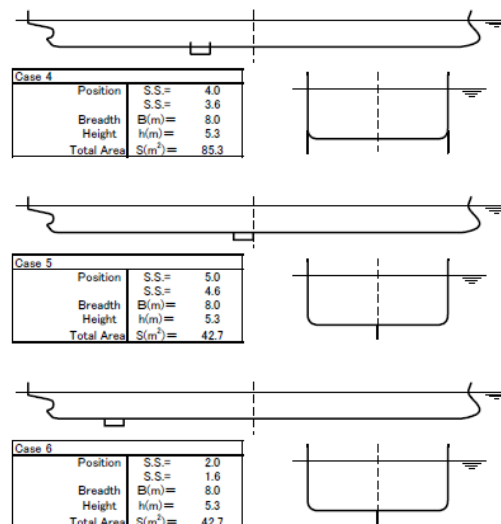
Para desarrollar este sistema de propulsión por viento se han ejecutado los siguientes pasos:

- Desarrollo de una configuración de vela y grúa conectada a la Superestructura móvil.
- Diseño de cuatro formas de vela diferentes, estudiando equipos para levantamiento y momentos.
- La Universidad de Madrid estudió 6 áreas de operación del Báltico a África Occidental, con las fuerzas del viento y situaciones.
- Simulaciones por ordenador de cuatro formas de vela diferentes.
- Construcción de un modelo a escala de la vela y test en túnel aerodinámico, lo que verificó la simulación (- el 9 %).
- Uso de los kW de potencia obtenidos para el perfil de operación y cálculos de estabilidad.

### 6.1.3.- Efectos de aletas sumergidas sobre la escora y deriva del buque.<sup>111</sup>

Los buques mercantes podrían estar equipados con los sistemas de velas desde el punto de vista del uso práctico y de la economía. El rendimiento de las velas debe mejorarse con el fin de realizar buques mercantes asistidos por viento. Pero cuanto mayor es la superficie de la vela para mejorar el rendimiento, mayores son los ángulos de escora y de deriva.

Como es conocido, las fuerzas dinámicas de los estabilizadores tipo aleta<sup>112</sup> instalados en la obra viva, reducen el ángulo de escora y el de deriva. Pero las disposiciones de una aleta en un buque mercante moderno asistido por viento, no se habían investigado profundamente hasta hace poco tiempo, que se estudiaron 6 diferentes configuraciones de diseños de aletas, de las que se muestran 3 en la figura 52.



**Figura 52: Disposiciones de los estabilizadores tipo aleta.<sup>113</sup>**

Las configuraciones de las aletas se han considerado desde el punto de vista propulsivo y de la deflexión del timón. Desde que con los cálculos computacionales es difícil estimar el efecto de la instalación de una aleta en la obra viva, el efecto se examinó mediante canales de pruebas hidrodinámicas en NMRI.<sup>114</sup>

Se construyó un modelo de simulación del buque asistido por viento, y se midieron las fuerzas hidrodinámicas de las aletas bajo el agua.

Primero se investigó el efecto de la superficie de la vela antes de estimar la disposición de las aletas, desde que la superficie vélica tiene influencia en el rendimiento de la navegación y en la actitud del buque. Después se determinó el buque para ser auxiliado con velas, un buque de carga general con 4 velas y mástiles. La configuración de las velas consistía en velas rectangulares flexibles y velas rígidas de perfil alar.

A partir del este estudio sobre el efecto de la superficie vélica y las diferencias entre las diversas configuraciones de las aletas usando el modelo de simulación, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

<sup>111</sup> "Investigation into Underwater Fin Arrangement Effect on Steady Sailing Characteristics of a Sail Assisted Ship" Yoshimasa Manami, Tadashi Nimura, Toshifumu Fujiwara, Mishio Ueno. Maritime Safety Department, National Maritime Research Institute, Mitaka, Tokyo. 2003.

<sup>112</sup> Fins

<sup>113</sup> Fuente: "Investigation into Underwater Fin Arrangement Effect on Steady Sailing Characteristics of a Sail Assisted Ship" Yoshimasa Manami, Tadashi Nimura, Toshifumu Fujiwara, Mishio Ueno. Maritime Safety Department, National Maritime Research Institute, Mitaka, Tokyo. 2003.

<sup>114</sup> National Maritime Research Institute

- Hallaron que la superficie de la vela está restringida enormemente debido al ángulo de deflexión del timón. La deflexión del timón tiene la tendencia a volverse mayor en navegación.

- De los resultados de la simulación se entendió, que en los pocos casos en los que la configuración de las aletas bajo el agua no depravan la eficiencia propulsiva, y puede mejorar el ángulo de deriva y la deflexión del timón en navegación.

- La disposición de las aletas bajo el agua más eficiente es el Caso 6, que es uno tipo quilla central colocada en la parte de popa del buque. El área de la aleta en este caso es menor que en los otros. Entendieron que la superficie de la aleta es pequeña para evitar resistencia friccional adicional y la localización de la aleta podría estar en la popa del casco para disminuir la deflexión del timón.

- El ángulo de escora no se ve muy afectado por las diferentes configuraciones de aletas. Debería investigarse la forma del casco con el fin de reducir el ángulo de escora.

- La aleta sumergida podría localizarse en la parte de popa del buque con restricción de la superficie del mismo para las facilidades en puerto y el rendimiento propulsivo.

Por lo que se concluyó que lo recomendable para el buque asistido por viento, sería la instalación de una aleta de superficie pequeña y colocada en la parte de popa del buque.

Debe estudiarse profundamente la estabilidad del buque en todas las condiciones de viento, con el fin de cuantificar los elevados momentos escorantes que supone la instalación de este tipo de sistemas. En todo momento el buque debe cumplir los criterios de estabilidad que garantizan y la seguridad del mismo. En realidad habría que hacer nuevos diseños de buques que permitiesen emplear estos sistemas de forma más segura. Los catamaranes podrían ser los futuros buques para utilizar sistemas de velas rígidas, debido a su elevado momento adrizante.

## 6.2.- Los rotores Flettner.

De la misma forma que una vela, el rotor Flettner consiste en un cilindro giratorio que desvía el viento hacia un lado, aprovechando las fuerzas resultantes para propulsar el buque en sentido longitudinal. Este sistema puede ser manejado automáticamente, variando su velocidad angular y su sentido de giro.

### 6.2.1.- Evolución histórica del rotor Flettner<sup>115</sup>

En 1852, el físico y químico experto en aerodinámica Heinrich Gustav Magnus, descubrió la fuerza desconocida hasta la fecha que aparece cuando el flujo de un fluido como el aire o el agua incide sobre un cuerpo en rotación. Magnus observó que cuando se trataba de cilindros en reposo dicho flujo se desviaba de modo uniforme por ambos lados del mismo, pero que si en cambio el cilindro se encontraba en rotación sobre su eje longitudinal, la corriente del fluido en un lado resultaba ayudada por el giro, mientras que el otro costado dicha corriente disminuía su velocidad, razón por la que dicha reacción vino a llamarse el efecto Magnus, en honor a su descubrimiento.

Frederick W. Lanchester desarrolló una teoría cualitativa sobre el empuje circulatorio aerodinámico en 1890, aunque no publicó sus resultados hasta 1907, con su libro "Aerodynamics".

En 1902, Wilhelm Kutta publicó los estudios que le llevaron a descubrir fórmulas importantes relativas al empuje de una sección aerodinámica<sup>116</sup>, y aunque sus resultados pudieron ser interpretados en términos de circulación, este efecto no llegó hasta después de la publicación por parte de Nikolai Joukowski de la teoría sobre la circulación el año 1906 en Russia.

La aerodinámica de lo que se ha llegado a conocer como el rotor Flettner, fue explorada primero por el Profesor Ludwig Prandtl, el padre de la aerodinámica moderna, en base a la teoría de Kutta-Joukowski. La joven ciencia de la aerodinámica proporcionó a Flettner la suficiente información experimental y ratificó su argumentación respecto a la aplicación de un rotor. Esto fue suficiente para convencer a sus sponsors en los Astilleros Germania en Kiel.

Anton Flettner era un ingeniero de aviación y un inventor que nació en Alemania en 1885. En 1924, asistido por Albert Betz, Jacob Ackeret y Ludwig Prandtl, hizo transformar un velero trimástil de tipo goleta<sup>117</sup> de 52 metros de eslora, llamado Buckau en un barco birrotor. Le colocó dos rotores de 18 metros de altura, 2,7 de diámetro y una velocidad de rotación de 120 revoluciones por minuto. Todo el sistema tan solo pesaba 7 toneladas, lo que supuso una gran reducción de peso comparado con las 35 de todo el sistema de mástiles y velas anteriores a la modificación. También era unos 12 metros más corto, por lo que mejoró la estabilidad transversal del buque. Una vez transformado, el buque fue renombrado como "Baden-Baden".

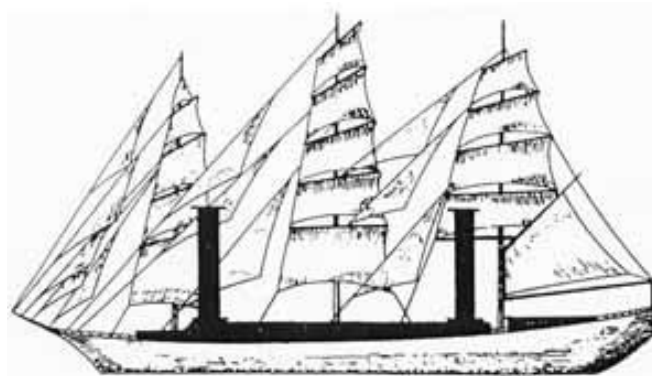
---

<sup>115</sup> Museo Técnico Alemán. Berlin; <http://www.sdtb.de/Flettner-Rotor.1623.0.html>

<sup>116</sup> Aerofoil

<sup>117</sup> Schooner

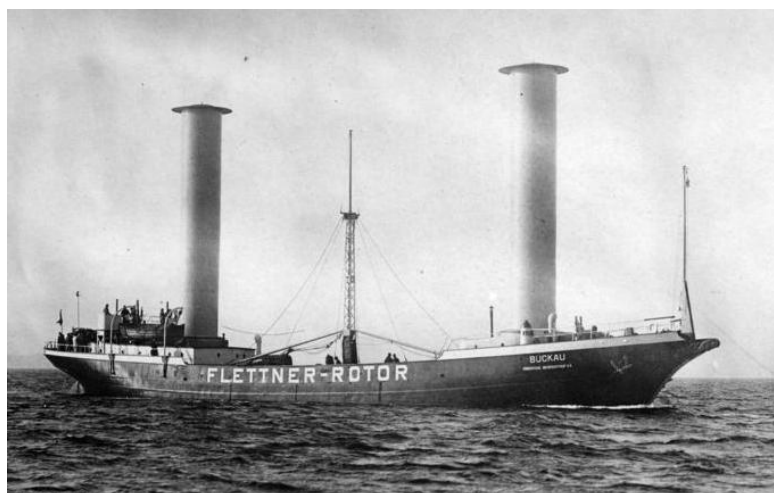




**Figura 53: Transformación velero tipo goleta en buque birotor.<sup>118</sup>**

El “Buckau” fue botado el 7 de Noviembre de 1924 en Kiel, y fue el primer buque con rotores del mundo. El nuevo sistema de propulsión auxiliar fue nombrado como su inventor Anton Flettner. Posteriormente, hizo importantes contribuciones al diseño de aviones y helicópteros.

Una dificultad del buque rotor era que para tomar el viento de otra dirección los cilindros, (que estaban movidos por un motor de 45 hp) debían ser detenidos mientras el buque giraba a través del viento usando sus motores auxiliares. De todos modos, el buque rotor podía navegar dentro de los 25º en dirección hacia el viento, mientras que antes de la conversión sólo lo podía hacer hasta 45º del viento.



**Figura 54: Buque birotor BUCKAU<sup>119</sup>**

El momento escorante del rotor a elevadas velocidades del viento era menor que el de la arboladura previa. Con un viento en su cuarta, el buque escoraría hacia el viento. La única desventaja de estos buques es que tienen que guiñar para desplazarse a favor del viento.

<sup>118</sup> Fuente: Historia y Arqueología Marítima. <http://www.histarmar.com.ar/InfGral/Flettnerbase.htm>

<sup>119</sup> Fuente: Deutsches-museum. <http://www.deutsches-museum.de/en/information/young-people/inventors-trail/drivetrains/flettner-rotor/>

Flettner usó bidones de hierro y después aluminio, aunque hoy en día se podrían construir de mucho más ligeros con Kevlar o materiales epoxy reforzados con carbono. Su mayor problema fue el de encontrar rodamientos capaces de soportar las elevadas fuerzas aerodinámicas a grandes velocidades.

Para demostrar la factibilidad de su nuevo invento, Anton Flettner corrió una carrera contra el buque gemelo velero Anon, de Danzig a Leith con una carga de madera. Aunque el viento fue en un momento tan fuerte que se debieron parar los rotores, el Buckau ganó.

Debido a este éxito, el Ministerio de Transporte de la Armada Alemana, a través de la Hamburg-Amerika Line, ordenó la construcción de diez buques-rotor, aunque sólo uno, el "Barbara" de 92 metros de eslora fue construido. Este disponía de tres rotores de 17 metros de alto y 4 de diámetro, impulsados por un motor eléctrico de 27 kW a 150 rpm. El "Barbara" que podía transportar 3.000 toneladas de carga y algunos pasajeros, operó entre Hamburgo e Italia durante seis años.



**Figura 55: Buque "Bárbara" con tres rotores Flettner.<sup>120</sup>**

Aunque el buque había demostrado su factibilidad y valor, el muy bajo precio del petróleo debido a su abundancia, más la demanda de un servicio constante, lo condenaron a sólo un éxito teórico.

Los dos prototipos probaron que el sistema funcionaba de forma fiable, y el buque BARBARA operó como un carguero convencional en el Mediterráneo entre 1926 y 1929. Pero no surgieron más pedidos de buques propulsados mediante un rotor, ni siquiera en los Estados Unidos, donde Flettner envió el Buckau en 1926 con fines de demostración. El combustible era tan barato en ese momento que los ahorros logrados por el rotor eran demasiado pequeños para que las compañías navieras recuperaran la inversión con la suficiente rapidez.

<sup>120</sup> Fuente: Deutsches Technikmuseum Berlin  
[http://www.sdtb.de/fileadmin/user\\_upload/tem/02\\_Ausstellungen/02\\_Sonderausstellungen/2010\\_02\\_Flettner-Rotor/415\\_268\\_BARBARA\\_frontal.jpg](http://www.sdtb.de/fileadmin/user_upload/tem/02_Ausstellungen/02_Sonderausstellungen/2010_02_Flettner-Rotor/415_268_BARBARA_frontal.jpg)



A raíz de la Gran Crisis de 1929 y de la caída que le siguió en el comercio mundial, el operador de chárter entregó el BARBARA a su propietario, la marina alemana en 1931. La marina de guerra a su vez vendió la nave a un nuevo propietario que desmanteló sus tres rotores, utilizando tan solo sus motores. Durante la crisis del petróleo en la década de los 70', la idea fue rejuvenecida por un grupo de compañías comerciales y fundaciones, la más conocida de ellas fue la Sociedad Cousteau, con sus barcos rotor "Moulin á Vent" y "Alcyone".

Cuando los precios del crudo aumentaron después de la crisis de 1973, las compañías navieras también se vieron afectadas, y empezaron a buscar alternativas. La idea de Flettner fue rescatada y los constructores de buques Blohm & Voss dibujaron planos para instalar rotores en un buque quimiquero. Pero la idea se difuminó cuando el precio del crudo volvió a caer en 1986.

### 6.2.2.- Las Turbovelas.

En 1980, el Capitán Cousteau soñó con crear un buque con una maquinaria moderna que sería propulsada, en gran parte por el viento, una fuente de energía limpia, gratuita y renovable. La idea de usar un cilindro hueco de metal y en rotación como medio de propulsión ya había sido probada y desechada unas décadas antes, por lo que Cousteau y un equipo de ingenieros decidieron revivirla y mejorarla. Cousteau y sus asociados, el Profesor Lucien Malavard y el Dr. Bertrand Charrier, usaron un cilindro fijo que funcionaba como el ala de un avión. Un obturador móvil y un sistema de aspiración mediante un extractor mejoraron la eficiencia de esta nueva vela. Se hicieron pruebas iniciales a escala en túnel de viento, y al funcionar perfectamente, el Turbosail había nacido.



Figura 56: Vista interior del Turbosail<sup>121</sup>

Cuando se comparó el coeficiente de sustentación con el de las mejores velas nunca construidas (como las velas Marconi en buques de la copa América o los sistemas de propulsión de velas cuadras rígidas Japonesas) se obtuvo que el sistema Turbosail es 3,5 o 4 veces superior y proporciona al sistema una ventaja única para la propulsión de buques.

<sup>121</sup> Fuente: Control of turbulent incompressible flows around bluff bodies using Large Eddy Simulations  
Guillaume FOURNIER, Stéphanie PELLERIN & Loc TA PHUOC.  
<http://archives.limsi.fr/RS2005/meca/aero/aero11/index.html>

El invento, fue probado primero en un catamarán llamado Moulin a Vent (windmill). Cousteau y sus compañeros validaron el sistema navegando de Tánger a Nueva York. El viaje estaba casi completado, cuando no muy lejos de la costa Americana, entraron en vientos de más de 50 nudos, y la soldadura que sostenía el Turbosail se rompió y cayó al mar.



**Figura 57: Buque “Moulin a Vent”<sup>122</sup>**

La experiencia del Capitán Cousteau resultó satisfactoria y le llevó a diseñar un nuevo buque. Trabajando con ingenieros navales, diseñó un innovador casco de aluminio ligero y resistente, con una popa con perfil de catamarán para aumentar la estabilidad y una proa de monocasco. Se le instalaron dos Turbosails en cubierta y dos motores diesel proporcionaron la propulsión complementaria al viento que era necesaria. El buque se llamó Alcyone.



**Figura 58: Buque Alcyone<sup>123</sup>**

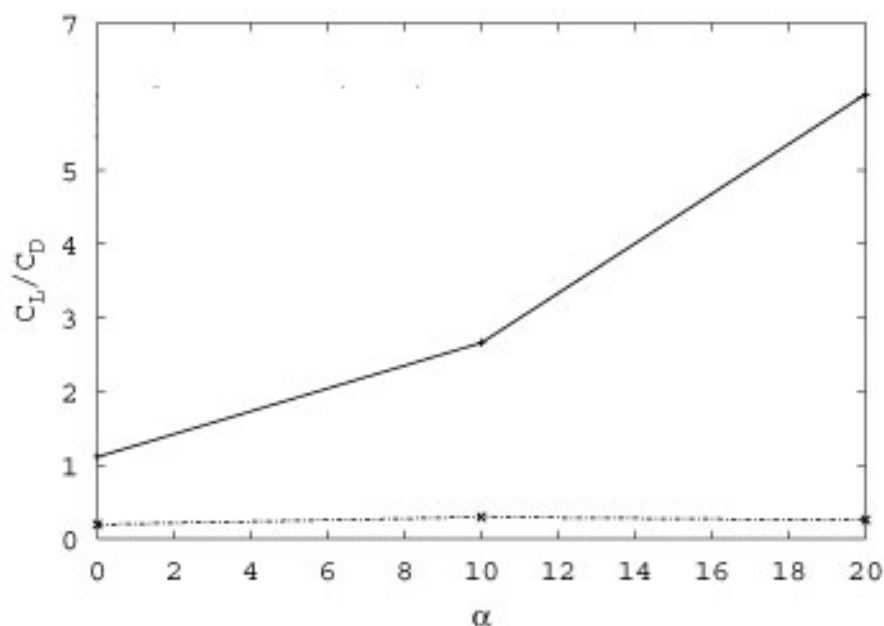
El Alcyone está dotado con la tecnología más moderna, de modo que las computadoras optimizan el funcionamiento de los Turbosails y las máquinas. Para mantener una velocidad constante, las máquinas toman el control automáticamente cuando el viento desciende, y se detienen completamente cuando el viento es fuerte y de la correcta dirección. La instalación de todos estos sistemas automatizados permite el control del buque con una sola persona, de modo que no es necesaria ninguna tripulación.

Cuando no se aplica la succión, el Turbosail tiene unos rendimientos aerodinámicos realmente pobres, como una vela. Aparece una elevada resistencia aerodinámica y ninguna fuerza de sustentación para los tres ángulos de incidencia considerados 0º, 10º y 20º.

<sup>122</sup> Fuente: <http://www.cousteau.org/expeditions/turbosail1>

<sup>123</sup> Fuente: Daughter of the Wind, Part I. Star thrower educational multimedia. Maintained by Dr. Bill Bushing. [http://www.starthrower.org/products/DDDB/DDDB\\_200-249/DDDB\\_220%20Alcyone%20part%201.htm](http://www.starthrower.org/products/DDDB/DDDB_200-249/DDDB_220%20Alcyone%20part%201.htm)

Sin embargo, cuando se enciende el extractor que se encuentra en la parte superior del cilindro con perfil alar, y sea cual sea el ángulo de incidencia, los rendimientos son claramente mejorados y entonces el Turbosail puede ser considerado como una forma muy eficiente de mover un buque. En la siguiente gráfica se representa la relación de los coeficientes aerodinámicos del sistema, de modo que la línea de puntos en la parte inferior vendría a ser cuando no se emplea el sistema de succión y en cambio la línea continua representa cuando el sistema tiene accionado el sistema de succión, lo que permite una mayor sustentación con respecto a la resistencia aerodinámica.



**Figura 59: Influencia de la succión en la eficiencia aerodinámica del Turbosail.**<sup>124</sup>

Desde 1985, el buque Acyclone ha sido el buque para las expediciones de la Sociedad de Cousteau, y permite ahorros de combustibles de hasta un 35 por ciento.

<sup>124</sup> Fuente: Control of turbulent incompressible flows around bluff bodies using Large Eddy Simulations  
Guillaume FOURNIER, Stéphanie PELLERIN & Loc TA PHUOC.

### 6.2.3.- Descripción del empuje creado por un cilindro en rotación.

Lo único que es necesario para crear un empuje es girar un objeto dentro de una corriente de aire. Estamos familiarizados con el empuje generado por el ala de un avión o a la curvatura que experimenta una pelota al coger efecto, pero un simple cilindro en rotación también creará empuje. De hecho, debido a que los campos de flujo asociados a un cilindro en rotación son de dos dimensiones, es más fácil de entender los fundamentos físicos de este problema que los aspectos de la curva que experimentaría una pelota que es de 3 dimensiones.

Los detalles de cómo un cilindro en rotación crea un empuje son todavía bastante complejos. Cerca de cualquier superficie, las moléculas de aire se adhieren a la superficie como se debate en las propiedades de deslizamiento de aire. Esta capa delgada de moléculas tratará de arrastrar o tirar del flujo que rodea en la dirección que se mueve la superficie. Por tanto, si se colocase un cilindro en rotación dentro del flujo de un fluido, con el tiempo crearía una hilatura, y un vórtice en el flujo de alrededor del cilindro.

La velocidad de rotación del cilindro, hace que en la superficie en que la dirección de rotación coincide con la dirección del viento aparente se sumen velocidades  $c$  y  $u$  medidas, y que en la que va en contra de la dirección de rotación reduzca la velocidad del viento por la superposición de los siguientes vectores:

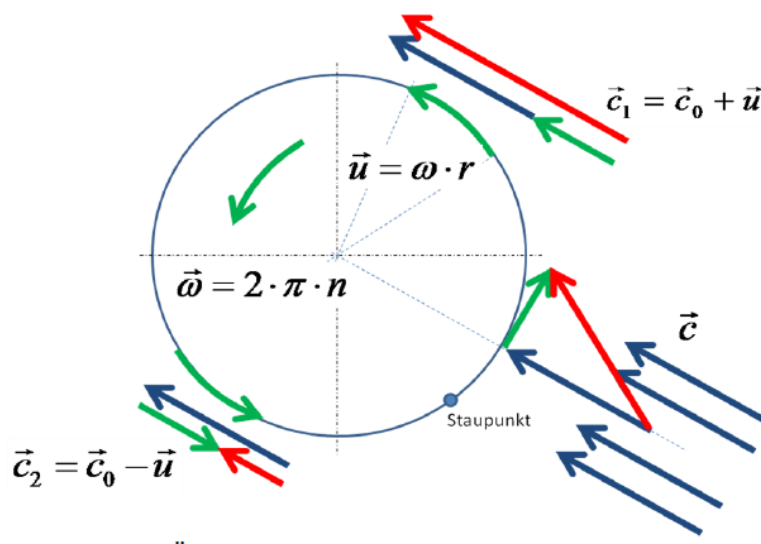


Figura 60: Superposición de los componentes de la velocidad en el rotor.<sup>125</sup>

<sup>125</sup> Fuente: MAGNUS-Effekt & FLETTNER-Rotor, Prof. Dr.-Ing. HOLGER Watter Escuela Técnica Superior de Flensburg. Universidad de Ciencias Aplicadas;

Dos antiguos científicos en la aerodinámica obtuvieron independientemente, la fórmula para cuantificar la elevación obtenida por un flujo de aire sobre un cilindro giratorio, estos eran Kutta en Alemania en 1910 y Joukowski en Rusia en 1906. La relación de elevación es directamente proporcional a la densidad del flujo  $\rho$ , la velocidad del flujo  $V_A$  y la intensidad del vórtice  $G$ .

$$L = \rho \cdot V_A \cdot G \quad [11]$$

La ecuación nos proporciona el empuje por unidad de longitud debido a que el flujo es de dos dimensiones. La fuerza del vórtice  $G$  es directamente proporcional a la velocidad de rotación del cilindro  $V_r$ , y de la circunferencia del cilindro.

$$G = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot V_r \quad [12]$$

En cuanto a la velocidad de rotación  $V_r$  se podría decir que viene determinada por la multiplicación de la circunferencia del cilindro por las revoluciones del mismo.

$$V_r = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot RPM \quad [13]$$

Por tanto, la fuerza sustentación  $L$  creada por un cilindro en rotación dentro del flujo de un fluido, viene determinado por la siguiente fórmula simplificada:

$$L = \rho \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot V_A \cdot RPM \quad [14]$$

Con esta fórmula se puede identificar fácilmente los influyen que factores en la generación de la fuerza resultante, de modo que si se analizan detenidamente, se puede observar que la velocidad del flujo y las revoluciones por minuto del cilindro son los dos únicos valores que pueden variarse, con el fin de aumentar o reducir la fuerza generada por el cilindro. En cuanto al radio del cilindro  $b$ , se encuentra elevado al cuadrado, de modo que aumenta exponencialmente la sustentación a medida que este lo hace, aunque una vez construido, ya no puede variarse. La densidad del fluido  $\rho$  es constante, como los demás números. La relación de aspecto en los rotores Flettner viene dada por su altura dividida entre su radio.

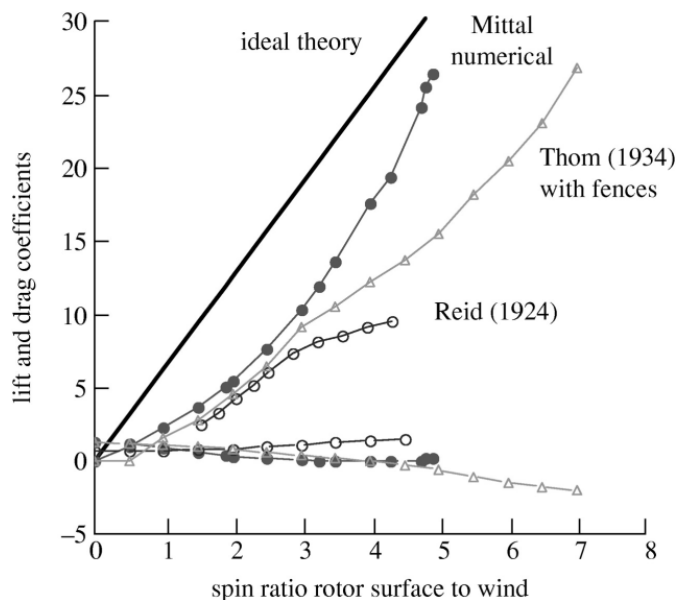
#### 6.2.2.1.- La sustentación y la resistencia aerodinámica de un rotor Flettner.

Las fuerzas de sustentación de un cilindro en rotación son mucho mayores que las de una vela de tela o el ala de un avión con la misma superficie expuesta al viento. La teoría predice que la sustentación por unidad de longitud de un rotor debería ser  $2\pi$  veces el producto de la velocidad de la superficie del rotor y la velocidad del viento. Esto significa que, para una velocidad constante del rotor, aumentará con la primera fuerza de la velocidad del viento mejor que con el cuadrado. Si la velocidad de la superficie del rotor y la velocidad del viento se mantienen en proporción, las ecuaciones de la ley del cuadrado pueden usarse para comparar con las velas y las alas. La relación de rotación<sup>126</sup> es relación entre la velocidad local

<sup>126</sup> Spin Ratio

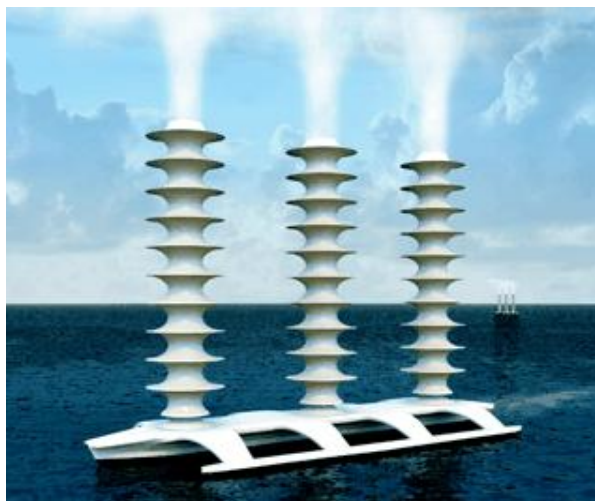
del rotor y la velocidad del viento, de forma que actúa como el ángulo de incidencia de un perfil aerodinámico del ala de un avión.

El coeficiente de sustentación de la teoría potencial ideal, como se ha usado con el cuadrado de la velocidad en el diseño de aviones, se muestra con una línea gruesa en la figura 61. La serie de circunferencias vacías son los resultados de las pruebas en túnel de viento realizadas por Reid en 1924 con un cilindro de 115 milímetros de diámetro. Este informó de que aparecían vibraciones excesivas suficientes para parar la prueba a 3000 revoluciones por minuto y una velocidad del viento del túnel de 10m/s, lo que vendría a ser una relación de rotación de 1,79, pero no aportó resultados para relaciones superiores a 4,32.



**Figura 61: Coeficientes aerodinámicos de rotores en función de la relación de rotación.**<sup>127</sup>

En 1934 se experimentó<sup>128</sup> con distribuir múltiples discos a lo largo de los rotores y se encontró que producían coeficientes de sustentación mucho mayores y a veces hasta coeficientes de resistencia aerodinámica negativos. Esto es debido al aumento de superficie del rotor expuesta al viento, en comparación con uno convencional. Estos rotores disponen de unos discos de tres veces el diámetro del rotor, distribuidos en intervalos de 0,75 veces el diámetro del rotor. Los coeficientes aerodinámicos de sustentación y de resistencia aerodinámica relativos a este diseño, están representados en la figura 61 por la serie de triángulos vacíos.



**Figura 62: Rotores Thom con discos.**<sup>129</sup>

<sup>127</sup> Fuente: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/366/1882/3989/F6.expansion.html>

<sup>128</sup> Thom (1934)

<sup>129</sup> Fuente : Flettner spray ship © J. MacNeill 2006

[http://farm4.static.flickr.com/3013/2819112348\\_f722058bfd\\_o.gif](http://farm4.static.flickr.com/3013/2819112348_f722058bfd_o.gif)



En la figura 63 se representan los coeficientes de sustentación y de resistencia aerodinámica de los nuevos rotores y las antiguas velas de la goleta Buckau, que fue reformada por Anton Flettner en el año 1924.<sup>130</sup>

En la figura 64, se representan los coeficientes de sustentación y de resistencia aerodinámica asociados a rotores Flettner, con relaciones de aspecto de 6,7 y 12 con uno que tiene discos Thom en intervalos de 0,75 del diámetro del cilindro. Como puede observarse, cuanto mayor es la relación de aspecto del rotor, mayor es el coeficiente de sustentación producido por el mismo.

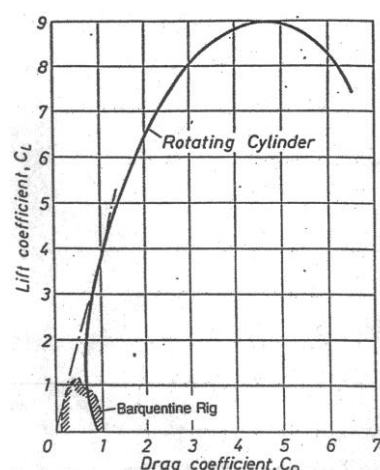


Figura 63: Eficiencia aerodinámica de rotor y de velas tipo goleta.<sup>131</sup>

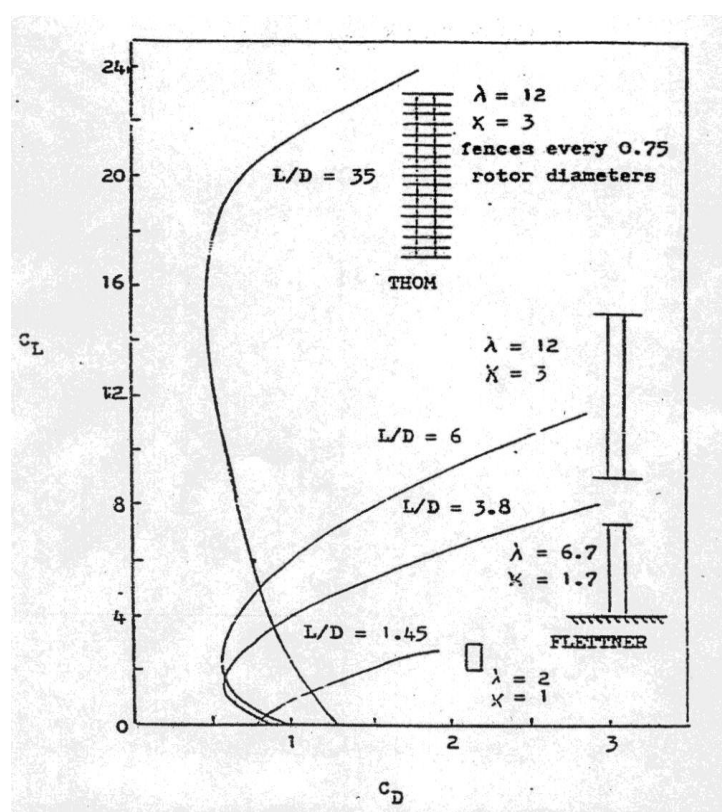


Figura 64: Eficiencia aerodinámica de diversos tipos de rotores.<sup>132</sup>

<sup>130</sup> A Flettner-Driven Catamaran, S H Salter, School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh

<sup>131</sup> Fuente: A Flettner-Driven Catamaran, S H Salter, School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh

<sup>132</sup> Fuente: A Flettner-Driven Catamaran, S H Salter, School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh. From Norwood 21<sup>st</sup> Century Multi-hulls, published by AYRS.

#### 6.2.4.- Aplicaciones actuales

Más recientemente, en el año 2007 la sociedad de construcciones eólicas Enercon encargó a los astilleros Lindenau Werft de Kiel, la construcción de un carguero de 130 m de eslora equipado, además de un motor diesel, con cuatro rotores Flettner. Desde que fue botado el 2 de agosto de 2008, la empresa lo emplea para transportar turbinas y otro equipamiento por todo el mundo.

El buque *E-Ship 1* es el primer carguero con rotores desde el buque BARBARA, y al entrar en funcionamiento este, puede haber abierto un nuevo capítulo en la historia de la navegación. Hoy en día, mientras los precios del petróleo amenazan con aumentar y se coloca cada vez más la importancia en las energías renovables, y la vela giratoria podría estar ganando en relevancia otra vez. La energía eólica aprovechada mediante cuatro rotores de 25 metros de alto por 4 de diámetro, para asistir la propulsión diesel eléctrica principal.



Figura 65: Buque E-Ship 1 con 4 rotores Flettner.<sup>133</sup>

Tabla 6: Especificaciones técnicas del buque E-Ship 1	
Eslora	130 m
Manga	22,5 m
Puntal	6 – 9 m
Desplazamiento	10.500 – 9.700 Tm
Velocidad	17,5 nudos
Potencia de la Máquina	2 x 3,5 MW
Capacidad, 3 bodegas bajo cubierta	20.580 m <sup>3</sup>
Clasificación Ice	E3

<sup>133</sup> Fuente: Michel FLOCH. August 29, 2011. Brest, France.

<http://www.shipspotting.com/gallery/photo.php?lid=1458180>



Hay una empresa<sup>134</sup> que distribuye unos rotores Flettner abatibles, que pueden ser estibados sobre la cubierta evitando así entorpecer las grúas en las operaciones de carga y descarga.

Una cuestión a tener en cuenta a la hora de instalar nuevos sistemas a bordo de un buque, es la posible obstaculización que puedan tener estos con las operaciones habituales de carga y descarga. Estas operaciones generalmente se realizan con grúas propias del buque o bien con las que dispone la terminal, y requieren muchos movimientos de las grúas, por lo que es importante que éstas dispongan de la máxima libertad de movimientos durante estas operaciones, para asegurar la ejecución de forma segura y efectiva.

El modelo de rotor a aplicar, viene dado en función del tamaño del buque en cuestión, limitándose la altura del mismo, hasta el valor de la manga del buque, con el fin de estibarlos sobre cubierta cuando entorpezcan el manejo de la carga.



Figura 66: Rango y rendimiento de los rotores propuestos.<sup>135</sup>

<sup>134</sup> [www.thiink.com](http://www.thiink.com)

<sup>135</sup> Fuente: <http://www.thiink.com/product/>

Esta empresa propone la aplicación de esta tecnología a los mayores tipos de buques petroleros y graneleros existentes hoy en día, desde los pequeños Handysize, pasando por los Handymax, los Panamax, los Aframax, los Suezmax, los VLCC/VLBC<sup>136</sup> y hasta los ULCC/ULOC<sup>137</sup>.

En la gráfica de la figura 66 se asigna a cada tipo de buque un rotor de tamaño acorde con el desplazamiento de cada uno de ellos. En las abscisas vienen representados los niveles en kW que nos puede proporcionar cada rotor, y en las ordenadas los 6 tipos distintos de rotores, relacionados con los desplazamientos más comunes en grandes cargueros.

<b>Tabla 7: Fuerza proporcionada por los diversos tipos de rotores Thiink.</b>						
	<b>BF4 / 60º</b>		<b>BF6 / 90º</b>		<b>BF8 / 90º</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Toneladas</b>	<b>kW</b>	<b>Toneladas</b>	<b>kW</b>	<b>Toneladas</b>	<b>kW</b>
<b>T380</b>	1,55	190	4,53	490	9,6	1170
<b>T420</b>	1,75	215	5,14	550	10,6	1280
<b>T520</b>	2,60	365	7,64	960	15,5	2150
<b>T620</b>	3,68	650	10,80	1520	21,9	3850
<b>T720</b>	5,00	970	14,50	2550	29,5	5750
<b>T820</b>	6,50	1270	19,10	3730	38,6	7580

La serie BF6 roja y la BF8 amarilla representan la potencia obtenida a partir de vientos provenientes de un ángulo de 90º respecto al rumbo y a unas velocidades equivalentes a los niveles 6 y 8 en la escala de Beauford, respectivamente. En cuanto a la serie BF4 azul podemos observar que el ángulo aparente del viento empleado para representar la fuerza obtenida es de 60º y no de 90º como en los anteriores. En la pequeña tabla podemos observar representadas las potencias obtenidas en toneladas y en kilovatios, en función de cada tipo de rotor y velocidades del viento.

Esta empresa proporciona los posibles beneficios que podría obtenerse a partir de la instalación de 3, 4, 5, o 6 rotores Flettner a bordo de un buque determinado. En concreto analizaremos la configuración de cuatro rotores, mientras que en el Anexo F se pueden observar las características y planos de la instalación de tres, cinco y seis rotores respectivamente.

<b>Tabla 8: Datos principales del buque propuesto por Thiink</b>	
<b>Eslora total</b>	225 m
<b>Eslora entre perpendiculares</b>	215 m
<b>Manga de trazado</b>	32,26 m
<b>Calado de trazado</b>	19,39 m
<b>Desplazamiento en Cv</b>	76.878 TM
<b>Maquina Principal</b>	KAWASAKI-MAN B&W 5S60MC-C
	MCO 12.570 PS / 89,4 RPM
	Normal 10.135 / 83,0 RPM
<b>Velocidad de servicio</b>	14,5 nudos

<sup>136</sup> Very Large Crude Carrier/ Very Large Bulk Carrier.

<sup>137</sup> Ultra Large Crude Carrier/ Ultra Large Bulk Carrier.

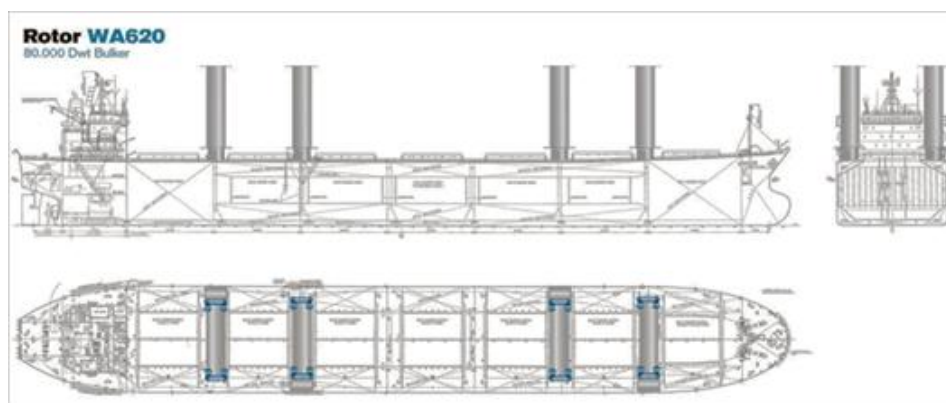


Figura 67: Proyecciones ortogonales del buque propuesto con 4 rotores abatibles<sup>138</sup>

Hay que tener en cuenta que estas predicciones están hechas para el buque propuesto navegando a 14 nudos, por lo que en la primera gráfica de la figura 68, sobre el empuje resultante de 4 rotores, cada serie representa una velocidad del viento aparente, y observado por el buque. En las abscisas vienen representadas las toneladas métricas de empuje proporcionadas por cada rotor, y en las ordenadas el ángulo aparente del viento respecto al rumbo.

En la segunda gráfica se representan la potencia propulsora equivalente a la instalación, relacionando la energía en kW respecto al ángulo aparente del viento.

La potencia propulsora equivalente depende del tamaño y de las características hidrodinámicas y aerodinámicas de cada buque individual, por lo que es muy difícil que una empresa garantice ahorros de combustible sin valorar previamente las características del buque y las condiciones meteorológicas de la ruta a realizar.

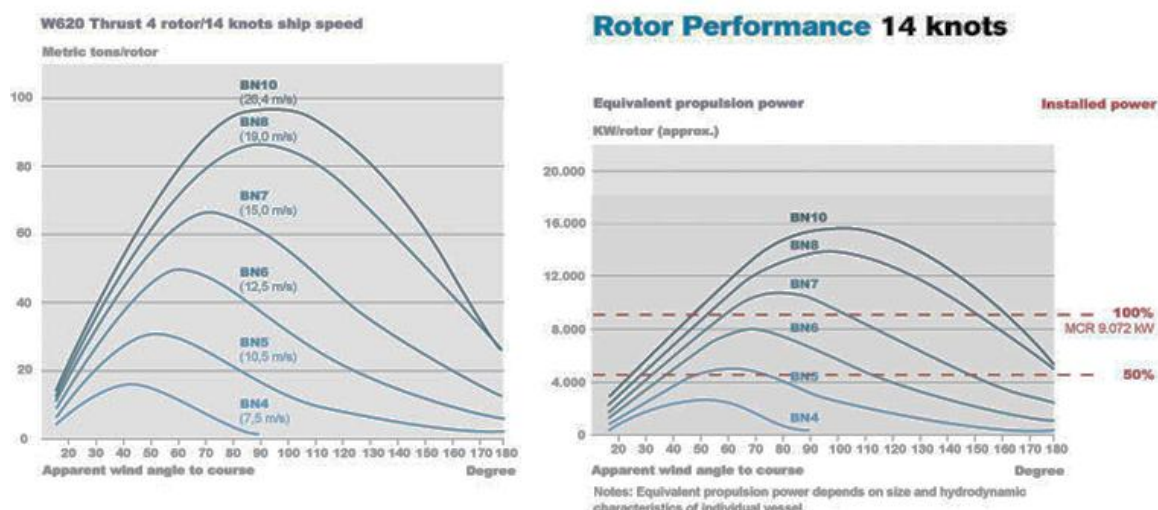


Figura 68: Empuje y rendimiento de 4 rotores Flettner.<sup>139</sup>

<sup>138</sup> Fuente: <http://www.thiink.com/rotor-performance-2/>

<sup>139</sup> Fuente: <http://www.thiink.com/rotor-performance-2/>

Otra empresa llamada Greenwave, ha usado modernas tecnologías de diseño, de fabricación y de materiales para crear un diseño de rotor Flettner protegido por una patente. Este incluye la creación de la Máquina de Viento en una forma modular que le permite ser almacenado en un contenedor para su fácil transporte a cualquier puerto en todo el mundo.

Han comparado las pruebas de rendimiento de los rotores realizadas en viajes reales, empleando datos obtenidos durante cuatro años de una pequeña flota de bulk-carriers. Estos resultados muestran un promedio de ahorro anual de un 13%, lo que llegaría a representar alrededor de 1.000 Toneladas de fuel por buque al año.

Las pruebas en túnel de viento realizadas por Greenwave han establecido que el empuje desarrollado por un Rotor Flettner es de 8 a 10 veces mayor que el empuje proporcionado por unas velas con una semejante superficie vélica. Su equipo ha realizado una serie de pruebas de rendimiento, manejo y estabilidad con un modelo a escala 25:1 de un buque en la Academia Marítima Warsash en Southamptorn. Bajo la supervisión de la sociedad clasificadora Lloyds Register, los resultados de la prueba del modelo muestran que un buque asistido por viento puede producir significantes ahorros de combustibles y de emisiones en vientos favorables.<sup>140</sup>



**Figura 69: Representación de las propuestas de Greenwave con 3 y 4 rotores.**<sup>141</sup>

Se fabricó un prototipo de tamaño real, de 17 metros de altura y 2,3 de en el puerto de Blyth en el nordeste de Inglaterra, en una zona cercana al mar donde generalmente aparecen fuertes vientos. El proceso completo con todo el equipamiento de pruebas para la evaluación de los resultados fueron monitorizados por un supervisor de la Lloyd's Register y el departamento Técnico de Investigación y Análisis de la sociedad clasificadora Lloyd's Register fue testigo de las pruebas verificándose así los resultados.

<sup>140</sup> Revista Horizons Junio 2010 Issue 29 Lloyd's Register.

[http://www.lr.org/Images/Horizons%20no%2029\\_tcm155-199091.pdf](http://www.lr.org/Images/Horizons%20no%2029_tcm155-199091.pdf)

<sup>141</sup> Fuente: <http://www.greenwave.org.uk/performance-parameters.html>

Son diversas las empresas que ya han lanzado propuestas para aplicar los rotores Flettner como ayuda a la propulsión en buques mercantes, como por ejemplo la compañía de ingeniería marítima finlandesa Wärtsilä, que asegura un ahorro de hasta un 30 por ciento del combustible.



Figura 70: Diseño conceptual rotores Flettner por Wärtsilä.<sup>142</sup>

Como podemos observar, los ahorros obtenidos a partir de los sistemas de propulsión eólicos, dependen directamente de las condiciones meteorológicas de la ruta en cuestión, por lo que no se puede asegurar en ninguno de los casos un ahorro del combustible de forma fiable. Aunque no está de más, conocer cuáles son las capacidades y las limitaciones de cada uno de los sistemas existentes.

#### Comparación del rendimiento aerodinámico de los diversos sistemas de propulsión.

A partir de las diferentes características aerodinámicas de los sistemas de propulsión a viento, se puede valorar qué sistema será el más eficiente aerodinámicamente, de modo que podrá proporcionar un mayor empuje longitudinal que contribuya a la propulsión del buque.

	TS	MS(DS)	RS	TG(MS)	BM	SW(MR)	WS(WF)	FR
Rig type	Traditional Square Rig	Modern Square (DYNA)	Rigid Square Rig	Traditional Gaff (MOD.G.)	Bermuda Mainsl.	Sail Wing (Mastrol)	Wing Sail (TE. FLAP)	Flettner Rotor (Surface)
$C_{Do}$	0.13	0.1 (0.07)	0.10	0.10 (0.07)	0.08	0.05 (0.06)	0.02	0.6 (0.2)
$C_{D1}$	0.65	0.46 (0.43)	0.58	0.35 (0.37-0.27)	0.28-0.23	0.36-0.26	0.27-0.17 (0.65-0.45)	4.0-5.6 (1.3-3.2)
$C_{CM}$	0.9	1.5	1.5	1.1 (1.2-1.5)	1.0-1.3	1.7 (1.6)	1.1-1.4 (1.8-2.0)	7.0-10.0 (2.2-3.2)
$FR_E$	0.5 $\approx FR_{SING}$	2.0 $\approx FR_{GEOM}$	1.5 $\approx FR_{GEOM}$	1.6 (2-3) $\approx FR_{SING}$	2-3 $\approx \frac{2}{3}FR_{GEOM}$	2-3 $\approx FR_{GEOM}$	2-3 $\approx FR_{GEOM}$	6-9 (2-3) $\approx FR_{GEOM}^{+(1-3)}$

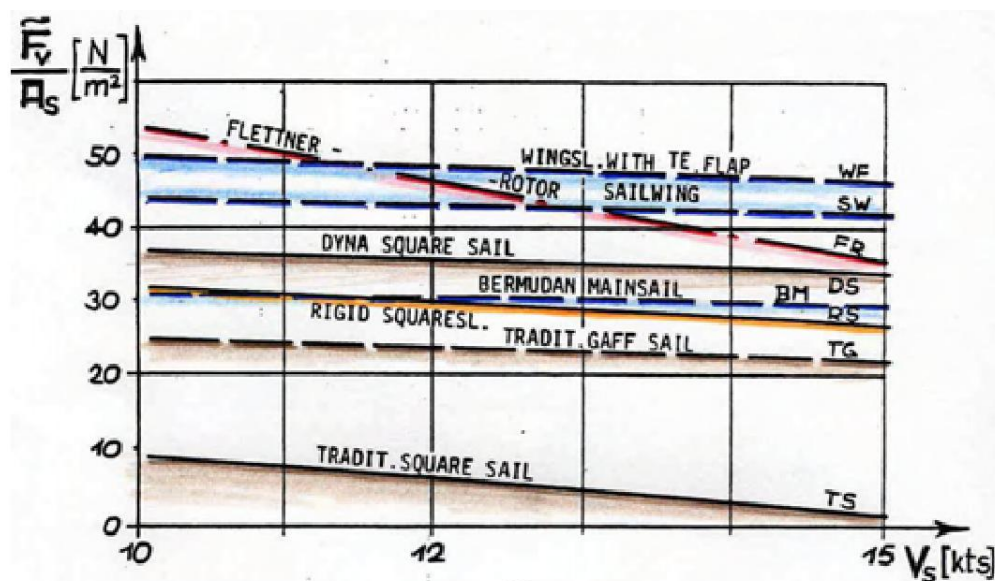
Tabla 9: Típicos parámetros aerodinámicos de algunos tipos básicos de velas.<sup>143</sup>

<sup>142</sup> Fuente: Rob Almeida On January 4, 2012. Part 2: How to Propel a More Efficient Ship.  
<http://gcaptain.com/part-propel-efficient-ship/?36494>



Entre los aparejos considerados, el 'Sail Wing' y 'Wing sail with trading edge flap' muestran los mayores empujes máximos, pero el primero tiene una menor resistencia aerodinámica en los momentos de máximo empuje, resultando en una mayor eficiencia aerodinámica.

Se ha llegado a determinar la fuerza directiva media que proporciona cada uno de estos sistemas, en función de la velocidad media del viento de una zona determinada. Esta fuerza por unidad de superficie de cada sistema, viene dada en Newtons por metro cuadrado. Como puede observarse en la figura 71, se representan las magnitudes de la fuerza proporcionada por cada sistema en función de la intensidad media del viento.



**Figura 71: Fuerza directiva media  $F_{xav}/A_s$  en función de la velocidad media del viento  $U_{av}$** <sup>144</sup>

<sup>143</sup> Fuente: Schenzle, P. "Estimation of Wind Assistance Potential" (1985).

<sup>144</sup> Fuente: Peter Schenzle. "Wind Propulsion for Solar Ship Operation". Hamburg, Germany. June 2006.

### 6.3.- Las cometas.

#### 6.3.1.- Introducción

Una cometa puede considerarse como la superficie de un ala, por lo que permite la aplicación de los conceptos aerodinámicos existentes de las alas. Por ejemplo, la fuerza resultante que actúa sobre una cometa se determina mediante el cálculo de la sustentación y la resistencia aerodinámica de la superficie de un ala de tres dimensiones, gobernada bajo el efecto de una velocidad relativa de viento y con un determinado ángulo de ataque. Mediante un cálculo de rendimiento se puede llegar a determinar la velocidad de equilibrio y la fuerza de remolque resultante.

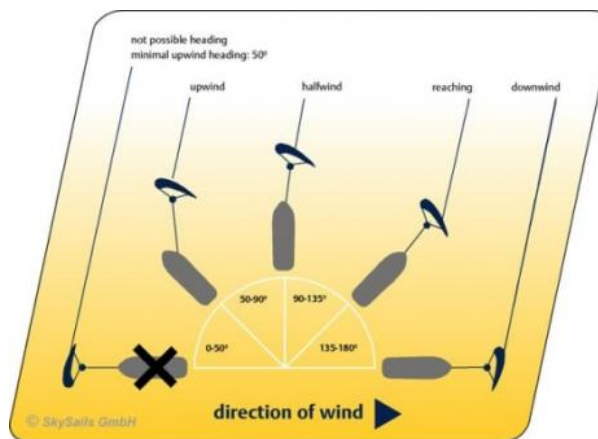


Figura 72: Plano de una cometa<sup>145</sup>

Si comparamos esta solución tecnológica con la propulsión mediante velas convencionales, el uso de una cometa puede proporcionarnos una serie de beneficios:

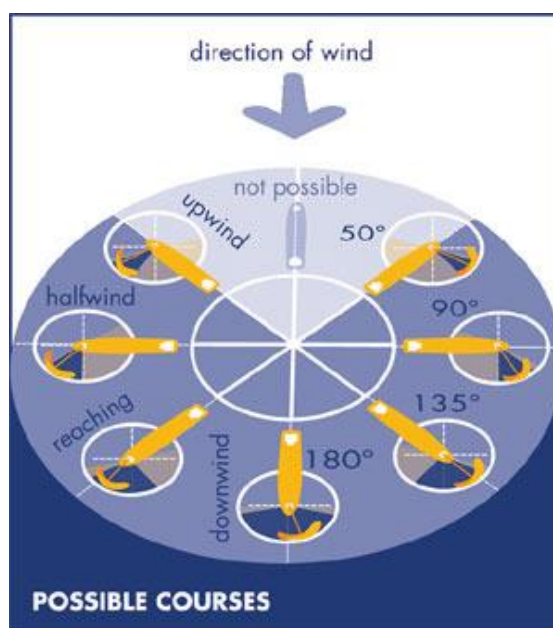
- Las cometas vuelan a 100-300 metros sobre el nivel del mar, lo que les permite generar 25 veces la energía proporcionada por velas convencionales, debido a las elevadas velocidades del viento a esas alturas.
- Comparando con otros sistemas de propulsión, las cometas no requieren mástiles y pueden ser fácilmente estibadas. Esto significa que necesitan muy poco espacio a bordo y que no estorbarán en las operaciones de carga y descarga.
- Pueden ser instaladas en casi cualquier buque de carga existente.
- Tiene unos costes de inversión bajos comparando a otros sistemas pero mayor eficiencia de ahorro de energía.
- Estos sistemas incorporan un sistema de control automático, lo que resulta en un fácil manejo y elevada fiabilidad.
- Una cometa puede ser controlada activamente con el fin de crear su propia velocidad de vuelo de modo que aumente su velocidad del viento aparente y consecuentemente la fuerza de tracción.
- Al contrario de los sistemas de propulsión a viento convencionales, las cometas causan pequeños ángulos de escora y por tanto, no es necesario el lastre. Debido a la baja posición del punto de anclaje de la línea de remolque, el momento escorante es considerablemente menor comparado con sistemas convencionales.
- Pueden volar a altitudes mayores, están expuestas a velocidades de viento más elevadas.

Se ha estimado que el uso de cometas puede reducir los costes de combustible entre el 10-35%, dependiendo de las condiciones del viento.

<sup>145</sup> Fuente: SkySails GmbH.

Aunque el uso de este sistema también puede acarrear diversos inconvenientes, como por ejemplo que las cometas no pueden ser manejadas en rumbos contra el viento, porque la fuerza es creada por el viento capturado en el área de la cometa estirando el buque, y por esta razón el sistema no puede ser usado cuando el viento aparente está por delante de las amuras.

El mayor inconveniente de las cometas es que no pueden utilizarse en vientos de baja velocidad. Algunos estudios revelan que el principal peligro de las cometas es el de caer en el agua, particularmente en la derrota del buque, sobrepasando cualquier beneficio financiero obtenido por este sistema. Además, la cometa no debería utilizarse en áreas con tráfico marítimo denso por razones de seguridad, ya que en estas zonas el buque podría necesitar cambiar rápidamente su rumbo o detenerse, lo que es difícil de hacer cuando una cometa está en vuelo.



**Figura 73: Posibles rumbos para la propulsión mediante cometas.**<sup>146</sup>

Es necesario hacer una diferenciación de la energía que proporciona una cometa, ya que por una parte existen sistemas que aportan una fuerza a la línea de remolque, y que únicamente son empleadas para reducir la potencia requerida a la maquinaria propulsora principal, y por otra están los sistemas que también generan energía eléctrica mediante el control dinámico de la cometa a través de una serie de ciclos periódicos. Pudiendo almacenar esta energía eléctrica en baterías o células de combustible, para su aprovechamiento tanto para propulsores principales en caso de ser eléctricos como para el suministro de los sistemas auxiliares de abordo.

<sup>146</sup> Fuente: [http://www.vos.noaa.gov/MWL/apr\\_09/skysails.shtml](http://www.vos.noaa.gov/MWL/apr_09/skysails.shtml)



### 6.3.2.- Evolución Histórica de las cometas.<sup>147</sup>

Las cometas nacieron en la antigua China y se sabe que alrededor del año 1200 a. C. las utilizaban como dispositivo de señalización militar, ya que con los movimientos y los colores de las mismas constituían mensajes con los que se comunicaban en la distancia entre destacamentos militares. En ocasiones también utilizaban grandes cometas con planos curvados que les permitían aprovechar la fuerza sustentadora del efecto Bernoulli.

En 1752 el político e inventor estadounidense Benjamín Franklin, llevó a cabo en Filadelfia su famoso experimento en el que ató una cometa con esqueleto de metal a un hilo de seda, en cuyo extremo llevaba una llave también metálica. Haciéndola volar un día de tormenta, confirmó que la llave se cargaba de electricidad, y así demostró que las nubes están cargadas de electricidad y que los rayos son descargas eléctricas.

En 1980 Miles L. Loyd escribió un artículo<sup>148</sup> de gran influencia en el que exploraba la posibilidad de generar energía eléctrica utilizando la fuerza de tracción de perfiles aerodinámicos amarrados, como por ejemplo, las cometas. También pudo observar que la velocidad relativa del aire y la fuerza de arrastre de la cometa podían ser incrementados haciéndola volar en direcciones perpendiculares a la dirección del viento. Por tanto, para maximizar la fuerza de sustentación de una cometa, se hace volar en trayectorias que permitan que reciba el viento por el través. Unos ejemplos de este tipo de trayectorias son la figura de ocho o la circular. Aunque la figura de ocho es la más preferida porque evita torsiones indeseadas en el cabo de remolque, ya que después de ser girado una vuelta completa alrededor de sí mismo, entonces es girado nuevamente en la otra dirección, al contrario que en la figura de círculo, con la que se hace girar la cometa siempre en la misma dirección, formando una circunferencia en el cielo.

Aunque el interés en la energía eólica se redujo notablemente durante la misma década debido a la sobreproducción de petróleo, no fue hasta la entrada en el siglo XXI cuando volvió a subir el interés en la energía procedente de las cometas con el trabajo de Meijaard, Wubbo, Schwab y Diehl.<sup>149</sup>

En 2001, apareció la primera investigación<sup>150</sup> académica sobre el control automático de cometas. En este trabajo, Diehl investigó la posibilidad de usar Modelos Predictivos de Control no lineales<sup>151</sup> para controlar la trayectoria de las cometas, iniciando así una línea de investigación que continúa hasta hoy en día.<sup>i</sup>

---

<sup>147</sup> "Automatic trajectory tracking control of kites", JORN H. BAAZEN, March 2011, Delft Institute of Applied Mathematics.

<sup>148</sup> "Crosswind kite power". M. L. Loyd. Journal of Energy. 1980.

<sup>149</sup> "Modelling of the dynamic behaviour of a Laddermill, a novel concept to exploit wind energy." J. P. Meijaard, W. J. Ockels, and A. L. Schwab. In 3rd International Symposium on Cable Dynamics, Norway, 1999.

<sup>150</sup> M. M. Diehl. Real-Time Optimization for Large Scale Nonlinear Processes. PhD thesis, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg, 2001.

<sup>151</sup> Non-linear Model Predictive Control (NMPC)

La compañía Kiteship fabrica sistemas de propulsión mediante grandes cometas para yates y está desarrollando diseños para aplicar en grandes cargueros. En 2004 se usó satisfactoriamente una cometa de  $420\text{ m}^2$  para impulsar un yate de 8,5 toneladas en Australia.

Recientemente, se han llevado a cabo diversas líneas de investigación, principalmente para estudiar el diseño del control para cometas utilizadas para remolcar barcos.<sup>152 153</sup>

En 2006 Beluga Shipping adquirió un sistema de cometa para instalarlo en el nuevo buque de carga pesada MS Beluga Skysails. Fue botado el 17 de Diciembre de 2007 y con una eslora de 132 metros estaba equipado con la primera aplicación comercial de propulsión mediante cometa. Tenía una superficie de  $160\text{ m}^2$  y estaba controlada por ordenador pudiendo reducir el consumo de combustible sobre un 15-20%. Desde entonces se han equipado a más buques con cometas y se han planeado más instalaciones.



**Figura 74: Sistema SkySails a bordo del Beluga Skysails<sup>154</sup>**

En Febrero de 2011, la compañía Cargill firmó un acuerdo con SkySails para instalar una cometa de  $320\text{ m}^2$  en un buque de 30.000 toneladas de peso muerto, convirtiéndolo en el mayor buque asistido por una cometa en todo el mundo. Bajo los términos del acuerdo, se instalará la cometa en el buque MV “Aghia Marina” durante el primer trimestre del 2012, y el sistema estará en funcionamiento en cuestión de semanas después. Este buque acaba de unirse a Cargill y Skysails para el desarrollo y la prueba de la nueva tecnología. Durante los próximos cinco años el M/V Aghia Marina, que tiene Cargill bajo charter de largo periodo, usará el sistema. Skysails será responsable de la formación de la tripulación, para el manejo del sistema de propulsión mediante cometa.

Hasta la fecha, SkySails ha instalado su sistema hasta en 5 buques de carga: el MV “Aghia Marina”, el MV “Theseus”, el MV “Michael A.”, el MV “BBC SkySails” y el ROS-171 “Maartje Theadora”.

<sup>152</sup> “Optimal control of towing kites” B. Houska y M. Diehl. In 44<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, pages 2693-2697, San Diego, CA, 2006.

<sup>153</sup> “Control of power kites for naval propulsion” L. Fagiano, M. Milanese, V. Razza y I. Gerlero. In American Conference, Baltimor, MA, 2010.

<sup>154</sup> Fuente: SkySails. New Energy for Shipping.

[http://www.dsm.com/en\\_US/cworld/public/media/downloads/publications/backgrounder\\_skysails\\_new\\_energy\\_for\\_shipping\\_with\\_relevant\\_sources.pdf](http://www.dsm.com/en_US/cworld/public/media/downloads/publications/backgrounder_skysails_new_energy_for_shipping_with_relevant_sources.pdf)

Actualmente existen dos firmas que han desarrollado sistemas de remolque con cometa para la aplicación en buques de carga: la compañía Alemana SkySails<sup>155</sup> y la Americana KiteShip<sup>156</sup>.

### 6.3.3.- Las fuerzas sobre una cometa.<sup>157</sup>

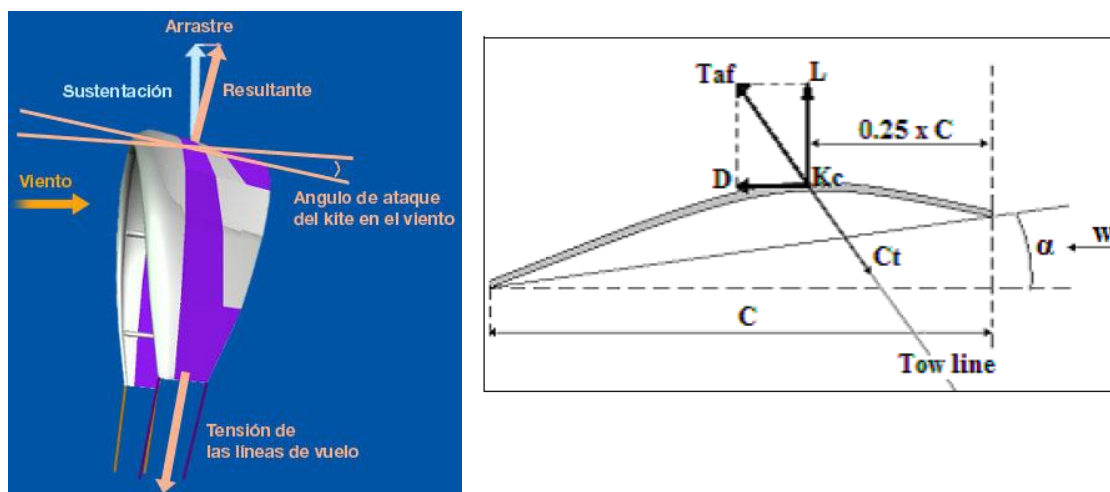
El hecho de poder considerar una cometa como una superficie de ala, nos permite la aplicación de tres principales fuerzas que actúan sobre ella: el peso, la tensión del cable de remolque, y la fuerza aerodinámica:

a) El *peso*  $W$  siempre actúa desde el centro de gravedad de la misma hacia el centro de la tierra. Según la primera ley de Newton sobre el movimiento, cuando la cometa se encuentra en vuelo estable, las fuerzas permanecen constantes, y no hay ninguna fuerza externa actuando sobre la misma. El empuje vertical más el peso son iguales a la fuerza de sustentación, y horizontalmente el empuje horizontal es igual al arrastre.

$$V_p + W - L = 0 \quad [15]$$

$$H_p - D = 0 \quad [16]$$

b) La *fuerza aerodinámica resultante*  $T_{af}$ , puede ser descompuesta en dos componentes, y viene dada por la fórmula [4]. Estas fuerzas son la de sustentación  $L$ , que actúa en sentido perpendicular al viento, y la de arrastre  $D$ , que lo hace en la dirección del viento. La fuerza aerodinámica actúa a través del centro de presiones  $K_C$ . A una determinada altura, el viento es bastante constante y casi paralelo a la superficie del mar. En este caso, la sustentación está directamente opuesta al peso de la cometa, como se muestra en la figura 75.



**Figura 75: Descomposición de la fuerza aerodinámica sobre una cometa<sup>158159</sup>**

<sup>155</sup> <http://www.skysails.info/english/>

<sup>156</sup> <http://www.kiteship.com/marine.php>

<sup>157</sup> "CONSIDERATIONS REGARDING KITE TOWED SHIP'S MANOEUVERING" NICOLAE GROSAN, DUMITRU DINU, Navigation and Maritime Transport. Maritime Engineering. Constanta Maritime University. ROMANIA. ISSN: 1792-4707 31 ISBN: 978-960-474-222-6

La fuerza de sustentación  $L$ , puede obtenerse mediante la fórmula [5] descrita en el apartado 5.1.2 del presente trabajo y la resistencia aerodinámica  $D$  se calcula con la fórmula [6]. En el Anexo G se muestra un ejemplo de cálculo de las fuerzas de sustentación y resistencia aerodinámica que forman la fuerza aerodinámica total en una cometa de  $500m^2$ .

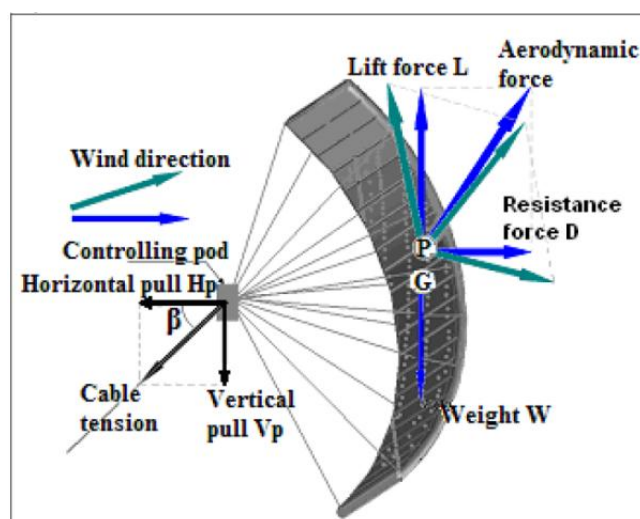
c) La *tensión del cabo de remolque* o de las líneas de vuelo actúan a través del punto de sujeción al que está trincado a la cometa. La tensión del cable puede ser dividida en dos componentes: el empuje vertical  $V_p$ , y el empuje horizontal  $V_H$ .

Cerca del punto de sujeción, la línea está inclinada un ángulo  $\beta$  llamado ángulo de brida, y la magnitud de este, está relacionada con la magnitud relativa de las componentes de tensión de la línea de remolque.

$$\tan \beta = V_p / H_p \quad [17]$$

Conociendo el ángulo de brida, la longitud de la línea, y el peso de la línea, se puede predecir la altura a la que vuela la cometa.

La resistencia relativa de las fuerzas, determina el movimiento de la cometa como se describe en las leyes de Newton sobre el movimiento. Si una racha de viento incide en el artefacto, aumentan la sustentación y la resistencia, y entonces este se mueve verticalmente porque el empuje vertical  $V_p$  ahora excede del peso, y consecuentemente aumenta la fuerza de tensión debido al incremento de la resistencia.



**Figura 76: Fuerzas sobre una cometa en vuelo.**<sup>160</sup>

<sup>158</sup> [http://blogs.comunitatvalenciana.com/kitesurf/files/2011/11/Aerodinámica.Kitemaniak.es\\_.jpg](http://blogs.comunitatvalenciana.com/kitesurf/files/2011/11/Aerodinámica.Kitemaniak.es_.jpg)

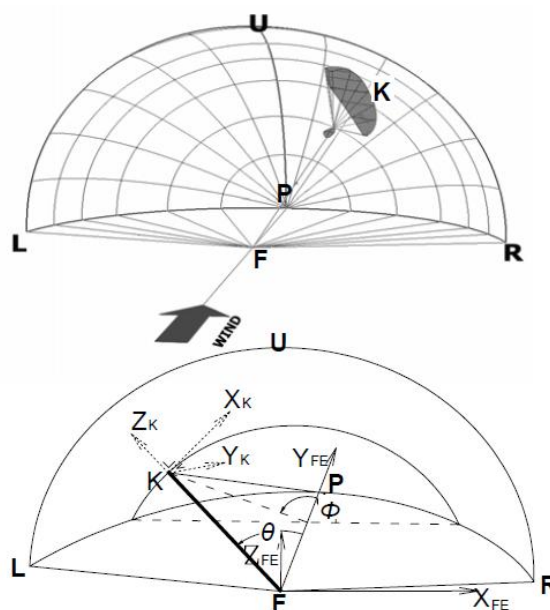
<sup>159</sup> Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering ISSN: 1792-4707 31 ISBN: 978-960-474-222-6

<sup>160</sup> "CONSIDERATIONS REGARDING KITE TOWED SHIP'S MANOEUVERING" NICOLAE GROSAN, DUMITRU DINU, Navigation and Maritime Transport. Maritime Engineering. Constanta Maritime University. ROMANIA. ISSN: 1792-4707 31 ISBN: 978-960-474-222-6

### 6.3.4.- La envoltura de vuelo<sup>161</sup>

Las posibles posiciones que puede ocupar una cometa en el espacio, atada a una línea de remolque con longitud  $r$ , pueden ser descritas por un cuarto de esfera con radio  $r$ , la cual se llama envoltura de vuelo<sup>162</sup>. Véase en la imagen 47 donde también está indicada la dirección del viento verdadero.

- W:** Velocidad del viento verdadero  
**F:** Sujeción de la línea de remolque  
**LUR:** Arista de la envoltura de vuelo  
**P:** Centro de la zona de fuerza



**Figura 77: Envoltura de vuelo de una cometa<sup>163</sup>**

Cuando se asume un flujo uniforme en altura en la envoltura de vuelo, P es el punto donde se obtiene la mayor velocidad y tracción de la cometa. Todos los semicírculos paralelos a LUR se llaman líneas iso-potenciales, en las cuales la velocidad y la tracción del sistema son constantes. Todos los segmentos de circunferencia desde P hacia la envoltura son líneas de iso-gradiente, dado que el gradiente de velocidad y fuerza de la cometa tienen un valor máximo constante sobre estas líneas.

El principal supuesto para el modelo, es el equilibrio instantáneo entre la dirección de la línea de remolque y la dirección de la fuerza resultante aerodinámica sobre la cometa. Para una cometa, este equilibrio depende de su posición en el espacio que será descrita mediante una envoltura de vuelo. La velocidad del viento experimentada por la misma es la combinación del viento aparente debido a la velocidad del buque y a la propia velocidad de vuelo de la cometa. Dependiendo de la posición, la cometa desarrollará su velocidad hacia una dirección en que la fuerza resultante sea paralela a la línea de remolque.

<sup>161</sup> "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite" Peter Naaijen & Vincent Koster, Delf University of Technology.

<sup>162</sup> Flight envelope

<sup>163</sup> Fuente: "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite" Peter Naaijen & Vincent Koster, Delf University of Technology.

### 6.3.5.- El ángulo de ataque de una cometa.<sup>164</sup>

Podemos descomponer la velocidad relativa del viento que incide en la cometa en dos componentes: la velocidad tangencial  $v_t$  y la velocidad radial  $v_{r-z}$ .

La velocidad radial es causada únicamente por el viento verdadero.

$$v_{r-z} = W \cos \theta \quad [18]$$

La velocidad tangencial  $v_t$  esta causada por una combinación del viento verdadero y de velocidad de la cometa. La parte debida a la velocidad de la cometa puede ser dividida en una parte tangencial a las líneas iso-potenciales en dirección de  $x_k$ , y en otra parte tangencial a las líneas de iso-gradiente en dirección de  $y_k$ .

La velocidad relativa del viento observado por la cometa viene dada por la siguiente fórmula:

$$v_{rel} = \sqrt{(v_t)^2 + (v_{r-z})^2} \quad [19]$$

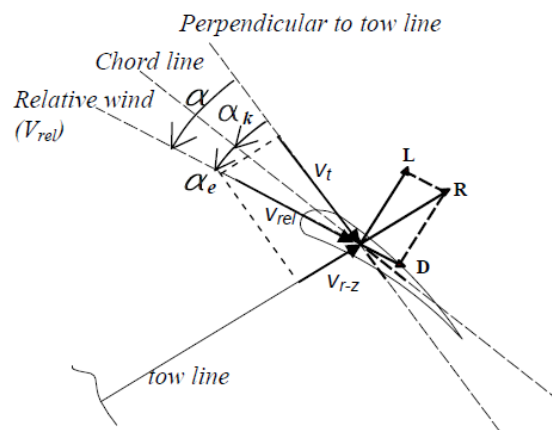


Figura 78: Ángulo de ataque de una cometa.<sup>165</sup>

La velocidad radial de la cometa únicamente es causada por el viento verdadero que soporta la misma. La relación entre el ángulo de ataque y las velocidades radiales y tangenciales relativas de la cometa, viene dada por la siguiente fórmula.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_{r-z}}{v_t}\right) \quad [20]$$

Para encontrar el ángulo de ataque efectivo  $\alpha_e$ , hay que restarle al ángulo de ataque  $\alpha$  y el ángulo  $\alpha_k$  al cual está atado la cometa a la línea de remolque.

$$\alpha_e = \alpha - \alpha_k \quad [21]$$

<sup>164</sup> "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite" Peter Naaijen & Vincent Koster, Delf University of Technology.

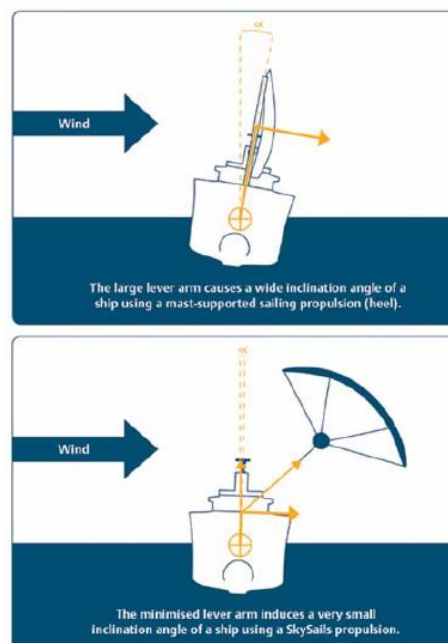
<sup>165</sup> Fuente: "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite" Peter Naaijen & Vincent Koster, Delf University of Technology.



### 6.3.6.-Las fuerzas ejercidas por una cometa sobre el buque remolcado.

Las fuerzas ejercidas por la cometa se consideran como fuerzas externas que actúan sobre el buque. De manera que hay diversas formas en las que estas fuerzas externas afectan sobre el rendimiento y con ello al consumo de combustible del buque. Básicamente se consideraran dos efectos:

- En sentido longitudinal, si se considera el efecto debido al empuje proporcionado por la cometa, la instalación propulsora será manejada en condiciones no previstas en su diseño inicial, por lo que para determinar el consumo de fuel se considerará el rendimiento de un propulsor y una maquinaria principal.
- Y en sentido transversal una fuerza perpendicular al avance, resultando en una fuerza lateral y un momento de guiñada. Afectarán a la resistencia del buque tanto el ángulo de deriva resultante del buque como el ángulo de timón necesario para asegurar mantener el equilibrio de esta fuerza.
- En cuanto al momento escorante producido por la cometa, puede decirse que será menor que el creado por cualquier tipo de velas convencionales o rígidas, ya que el punto de sujeción de la cometa se encuentra a una menor distancia del centro de gravedad del buque, por lo que el momento será menor.



**Figura 79: Momento escorante debido al remolque con una cometa.**<sup>166</sup>

Si se conocen los valores de las fuerzas que componen la fuerza aerodinámica total de la cometa, se pueden idear escenarios de dirección del viento mientras se mantiene constante la fuerza del viento y el ángulo de incidencia, de modo que podrá predecirse la influencia sobre el rumbo del buque.<sup>167</sup>

La fuerza aerodinámica de un valor específico tiene la posibilidad de mover el buque a una reducida velocidad mientras lo deriva de su rumbo. Pero como el efecto del timón cuando la velocidad del buque es baja es insignificante se requiere el uso de la máquina principal para recuperar el rumbo inicial. La deriva en sí, no es de gran valor en distancias cortas pero en distancias largas es considerable.

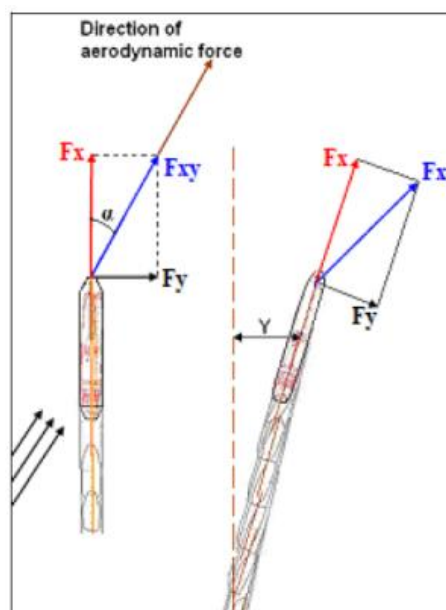
<sup>166</sup> Fuente: SkySails GmbH.

<sup>167</sup> "CONSIDERATIONS REGARDING KITE TOWED SHIP'S MANOEUVERING" NICOLAE GROSAN, DUMITRU DINU, Navigation and Maritime Transport. Maritime Engineering. Constanta Maritime University. ROMANIA.

La fuerza ejercida por la cometa sobre el buque, es resultado de la fuerza aerodinámica del viento sobre la cometa. Si se proyecta la dirección de la fuerza aerodinámica sobre el plano del mar, se puede descomponer en sentido longitudinal y en sentido transversal.

Si se considera un viento justo por la popa del buque, la proyección de las fuerzas de la cometa sobre el plano del agua están representadas por  $F_X = F_{XY}$ . El valor de la fuerza  $F_Y$  que desplaza el buque fuera de su rumbo normal es cero o casi cero, razón por la que el buque mantiene el rumbo inicial.

Si se considera un viento del rumbo 210°, como se representa en la figura 80, la fuerza de tracción  $F_X$  es mayor que  $F_Y$ . El valor de  $F_Y$  no es tan grande pero el buque es desplazado fuera de su rumbo inicial. En cambio si se considera un viento del 240°. El valor de la fuerza de tracción  $F_X$  es más pequeña que en el caso anterior y la de  $F_Y$  es mayor.

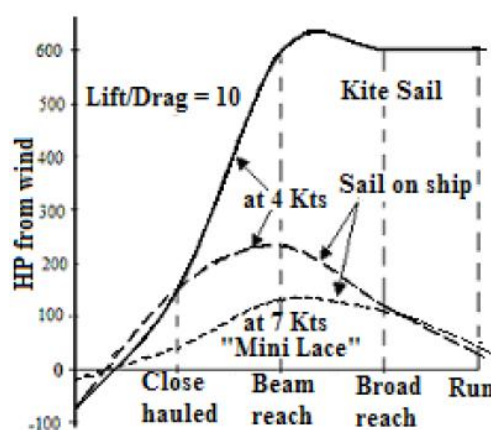


**Figura 80: Las fuerzas sobre el buque con cometa para un viento de 30° por popa.**<sup>168</sup>

Por tanto, una de las razones por las que no se podría navegar, con la única propulsión de una cometa, es que uno de los efectos de la tracción de la cometa es la guiñada del buque, que debe ser reducida mediante el uso del timón. Pero a velocidades bajas, según sus resultados obtenidos en referencia a la fuerza de tracción, el efecto del timón es inefectivo y se hace necesario usar la máquina principal para volver el buque a su rumbo.

Por lo que puede deducirse, que dependiendo la dirección y la velocidad del viento aparente, la fuerza aerodinámica ejercida sobre la cometa causará un ángulo de deriva del buque, resultando en una adicional resistencia al avance.

En la figura 81 se representa la energía obtenida por varios tipos de velas con varios ángulos del viento aparente. Esto fue originalmente publicado por Loyd Bergessen a favor del diseño del Mini Lace en 1981, luego adaptado para las cometas Schmidt en 1985, y finalmente por Roesler en 1996 para cometas más eficientes. La ventaja de las cometas eficientes sobre las velas convencionales a la hora de asistir buques de carga lentos sería de 10:1.<sup>169</sup>

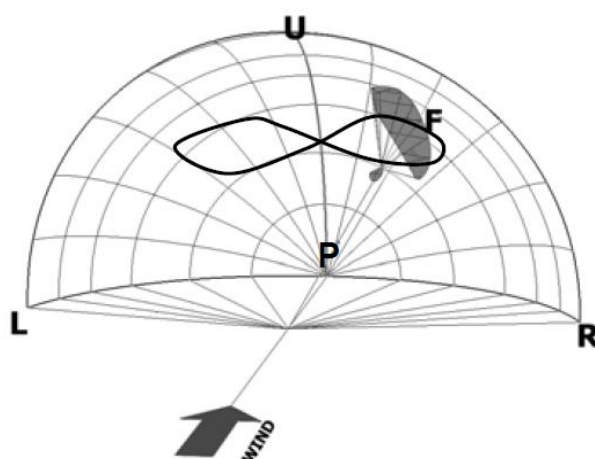


**Figura 81: Energía del viento.**<sup>170</sup>

<sup>168</sup> "CONSIDERATIONS REGARDING KITE TOWED SHIP'S MANOEUVERING" NICOLAE GROSAN, DUMITRU DINU, Navigation and Maritime Transport. Maritime Engineering. Constanta Maritime University. ROMANIA.



Uno de los beneficios de una cometa es que su velocidad relativa puede incrementarse maniobrándola activamente sobre una ruta deseada en su envoltura de vuelo. Una cometa en vuelo dinámico puede generar hasta 25 veces la fuerza que un perfil aerodinámico estático o cometa de la misma superficie. Además, al estar amarrada a un mástil relativamente bajo, con respecto al centro de gravedad del buque, genera un momento escorante menor que las velas convencionales y ocupa menos espacio en cubierta.



**Figura 82: Posible evolución de la cometa sobre la envoltura de vuelo.**<sup>171</sup>

En el caso de una cometa remolcando un buque, el viento que entra en la envoltura de vuelo es en realidad una combinación del viento verdadero y el viento creado por la propia velocidad del buque. En general la dirección de estos dos no coincidirá. La envoltura de vuelo está situada en el buque de forma que su margen es perpendicular a la dirección del viento debido a la combinación del viento verdadero y la velocidad del buque a la altura media de vuelo de la cometa. Mientras que la altitud de la cometa volando se supone que está en una capa superior de la superficie de la atmósfera, donde el viento es producido por diferencias de presión y no ocurre ningún viento geostrófico, la variación de la velocidad del viento en altitud puede ser expresada por una función logarítmica.

Dependiendo de la dirección del viento aparente con respecto a la dirección de navegación, puede definirse un determinado rango de posiciones horizontales de la cometa, resultando en una fuerza de tracción, teniendo una componente en la dirección de navegación.

<sup>169</sup> Billy Roeseler, Theo Schmidt, Andrew Beattie, Cory Roeseler, Dave Culp, Russell Long, TadMcGeer, & Richard Wallace - The Case for Transport Sail Craft, *World Aviation Congress*,

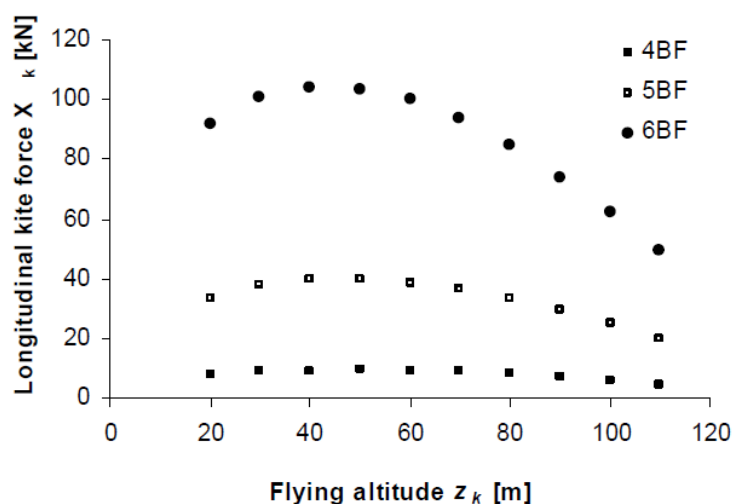
<sup>170</sup> Fuente: *Sail assist developments 1979–1985* Lloyd Bergeson. Wind Ship Company, Norwell, MA., USA  
C. Kent Greenwald (Consultant & Formerly Chief Research Engineer) Wind Ship Company, USA.

<sup>171</sup> Fuente: "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite" Peter Naaijen & Vincent Koster, Delf University of Technology.

En cuanto a la posición vertical de la órbita de la cometa, se puede encontrar una altura de vuelo óptima resultando en una mayor fuerza de tracción en la dirección de navegación del buque, en sentido longitudinal. La altitud de vuelo óptima es gobernada por la variación de:

- La fuerza de tracción en la envoltura de vuelo.
- La velocidad del viento en altura.
- La fuerza de tracción horizontal con inclinación de la línea de remolque.

Se han realizado unos estudios mediante simulaciones de la cometa, volando a lo largo de una ruta orbital, para evaluar el efecto de la altura de vuelo sobre la fuerza ejercida por la cometa en sentido longitudinal  $X_{kite}$ , y para hallar la altitud óptima de vuelo en términos de máximo  $X_{kite}$ , y para diferentes altitudes de vuelo durante el caso estudiado. En la figura 83 se muestran los resultados obtenidos del cálculo de la fuerza de tracción en sentido longitudinal del buque, para diversas altitudes de vuelo y para tres diferentes velocidades del viento, considerando una longitud de línea de remolque de 150 metros.



**Figura 83: Fuerza de la cometa en función de la altura de vuelo.**<sup>172</sup>

La altura en la que aparece la máxima fuerza de remolque hacia adelante, se alcanza del 27 al 33% de la longitud del cabo de remolque, disminuyendo notablemente a partir de este punto, a medida que aumenta la velocidad del viento. Los resultados presentados en la figura 83 están realizados para una dirección del viento igual al rumbo de navegación, es decir, a 0 grados por la popa. Se han realizado cálculos similares para diferentes direcciones del viento, resultando al mismo nivel las alturas de vuelo óptimas.

<sup>172</sup> Fuente: "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite" Peter Naaijen & Vincent Koster, Delf University of Technology.

### 6.3.7.- Implementación de una cometa de $500m^2$ en un buque tanque de 50.000 T de peso muerto.

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados para la implementación de una cometa en un buque propulsado por una maquinaria diesel de 12.000kW, un peso muerto de 50.000T y a una velocidad de 15,5 nudos.

Una razón para elegir un buque tanque con una velocidad de avance tan baja es porque es más probable que este tipo de buques se vean beneficiados de la propulsión del viento, ya que la dirección del viento aparente provendrá relativamente más por la popa de lo que lo haría en buques más rápidos. Otra razón es porque se llevaron a cabo extensos experimentos por Journee en el laboratorio de hidromecánica de buques en la universidad de Delft a finales de los sesenta con un modelo de este buque en particular proporcionando así toda la información hidromecánica sobre el casco para realizar los cálculos de rendimiento. Una descripción más detallada del buque usado para el caso puede ser encontrada en el siguiente artículo<sup>173</sup>.

Para la forma de la sección transversal se ha empleado una sección similar a los aerofoils que a menudo se emplea para kite surfing, la cual es NACA4415. Un ala con un área de  $500m^2$  y una relación de aspecto de cuatro ataduras a una línea de remolque de 350m de largo. En el Anexo G, aparece un ejemplo de cálculo de las fuerzas ejercidas sobre esta cometa.

El resultado del caso descrito, se presenta mediante un diagrama polar que representa el ahorro relativo de combustible en la figura 84. El eje angular representa las direcciones del viento aparente, y la distancia radial desde el origen, representa el consumo de fuel como un porcentaje del combustible en función de cómo sería sin usar la cometa. Las diferentes líneas representan las diferentes velocidades del viento, tal como se representa en la leyenda. En todas las condiciones que se han calculado, se han incluido las resistencias inducidas por el viento y la añadida por las olas. La resistencia del viento se ha calculado de acuerdo con el artículo de Isherwood<sup>174</sup>.

Para las condiciones con viento de proa, la cometa no puede manejarse de manera que proporcione fuerza propulsiva resultante hacia adelante, razón por la que no hay ahorro de combustible con vientos de proa.

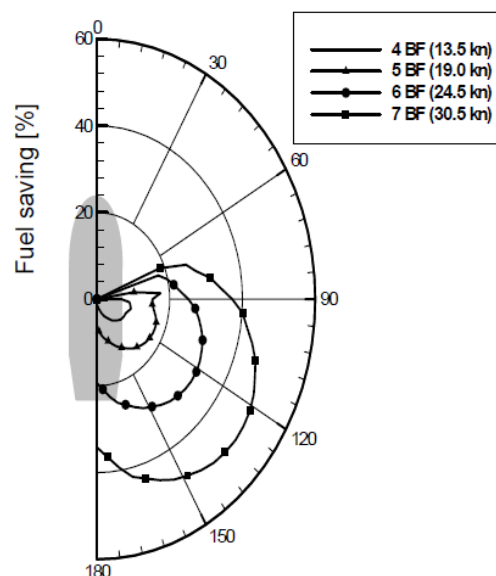
---

<sup>173</sup> Naaijen P.,Koster V.,Dallinga R.P On the Power Savings by an Auxiliary Kite Propulsion System, ISP Volume 53 No.4 2006

<sup>174</sup> Isherwood, R.M., Wind Resistance of merchant Ships, Trans. Of the Royal Institution of Naval Architects, 1973.

Como puede observarse en la figura 84, los ahorros de combustible alcanzan un 32% cuando el vuelo se realiza en un viento de fuerza 6 en la escala Beaufort, mientras que para los de fuerza 7 los ahorros llegan a cuantificarse hasta un nivel máximo de 50%.

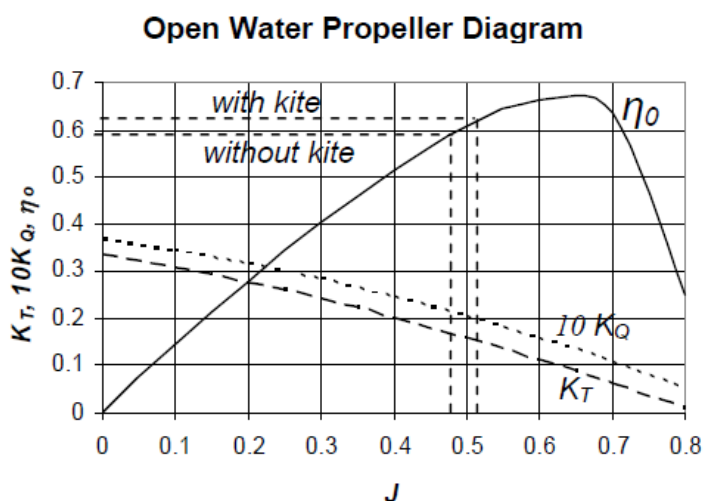
Teniendo en cuenta la resistencia de la deriva incluida y la operativa desfavorable no prevista de la instalación propulsora existente, se hacía esperar un resultado en el que se ahorrara un menor nivel de combustible que la fuerza propulsiva contribuida por la cometa. Sin embargo, este resultado no apareció en el caso estudiado. Eventualmente el ahorro relativo de combustible supera la fuerza propulsiva relativa proporcionada por la cometa en algunos casos. Una explicación para ello puede ser encontrada en la eficiencia del propulsor en aguas abiertas.



**Figura 84: Diagrama polar del ahorro relativo de combustible para una cometa de  $500m^2$ .**<sup>175</sup>

Se indican para la máxima fuerza propulsiva de la cometa sometido a una fuerza 7 de la escala Beaufort, el punto de diseño sin cometa y el punto de diseño en condiciones no previstas con cometa.

La figura 85, se muestra que la eficiencia del propulsor en aguas abiertas cambia de 0,59 a 0,63, un incremento del 6,8%. También fue mencionado un efecto similar por Molland<sup>176</sup> en 1985. El incremento de la eficiencia en aguas abiertas parece ser mayor que el incremento del consumo específico de combustible en el freno<sup>177</sup> de la máquina propulsora para este caso: el BSFC incrementa un 1,4%.



**Figura 85: Diagrama del propulsor en aguas abiertas.**<sup>178</sup>

<sup>175</sup> Fuente: "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite" Peter Naaijen & Vincent Koster, Delf University of Technology.

<sup>176</sup> Molland, A.F. "Operation of Propellers and Machinery in Wind Assisted Ships, Proc. Of the First Wind Assisted Ship Propulsion Symposium, Glasgow, 1985.

<sup>177</sup> BSFC Brake Specific Fuel Consumption

<sup>178</sup> Fuente: "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite" Peter Naaijen & Vincent Koster, Delf University of Technology.

Otro efecto desfavorable en el consumo de combustible proviene de la fuerza transversal y del resultante momento de guiñada inducido por la cometa. Debido a esto, son necesarios determinados ángulos de deriva y de timón para obtener un equilibrio de las fuerzas en sentido transversal y un equilibrio del momento de guiñada. Ambos resultarán en un incremento de la resistencia.

El equilibrio de la guiñada se obtiene mediante el uso del timón. El momento del timón y el momento hidrodinámico en el casco tienen direcciones opuestas. A partir de lo que se puede concluir, que la posición óptima para amarrar la cometa es en la amura del buque, de modo que se minimiza el ángulo requerido de timón para obtener el equilibrio en la guiñada. Siendo pues, los ángulos de timón requeridos no son superiores a  $4^\circ$  mientras el ángulo máximo de abatimiento no supera  $1^\circ$ , resultando en una máxima resistencia total inducida debida al abatimiento y al ángulo de timón inferior al 1%.

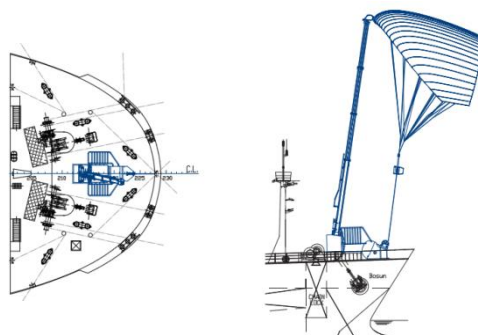
La elevada eficiencia de la carena se debe al hecho de que la velocidad del buque se mantiene cuando se usa una cometa como propulsión auxiliar, aunque por el contrario, se obtienen menos resultados favorables cuando el buque se propulsa únicamente mediante una cometa, lo que acaba resultando en un dramático descenso de la velocidad avante del buque.

Las principales conclusiones obtenidas son:

- El ahorro de combustible teórico que puede llegar a alcanzar un buque tanque de 50.000Tm de peso muerto, es de un 50% con vientos por la aleta de fuerza 7 en la escala Beaufort, usando una cometa de  $500\text{ m}^2$  trincada a una línea de remolque de 350 metros.
- La altura óptima de vuelo se alcanza aproximadamente en el 30% de la longitud del cabo de remolque.
- Trincar el cabo de remolque a la proa minimiza los ángulos de timón requeridos.
- Las pérdidas debidas al abatimiento, los ángulos de timón y las condiciones no previstas de la operativa de la máquina propulsora, son pequeñas y contrarrestadas por una mejorada eficiencia del propulsor en aguas abiertas, resultando en un ahorro relativo de combustible que aproximadamente iguala la tracción relativa proporcionada por la cometa.

### 6.3.8.- Aplicaciones actuales y perspectivas de futuro.

El sistema SkySails incluye tres componentes principales: Una cometa de tracción con cable, un sistema de despegue y aterrizaje al igual que un sistema de manejo completamente automático. En vez de velas tradicionales con mástil SkySails utiliza grandes cometas para crear la propulsión. Su forma es comparable con la de un parapente. La cometa de tracción está hecha de fibras textiles altamente resistentes y a prueba de las inclemencias del tiempo (lluvia, sol...).



**Figura 86: Planta y perfil del sistema SkySails montado a bordo.**<sup>179</sup>

Las cometas SkySails remolcando a los buques, pueden operar en alturas de entre 100 y 300 metros, en las cuales reinan vientos más fuertes y constantes. Este tipo de sistemas generan entre el doble y el triple de la energía comparado con velas convencionales. Las fuerzas de tracción son transmitidas al barco a través de un cable de plástico altamente resistente.

Un sistema automático realiza el despegue y la recogida de la cometa, durante un proceso que dura entre 10 y 20 minutos. Para el despegue, la cometa se eleva de su depósito por el mástil telescópico. Una vez la cometa ha llegado a la altura mínima, se despliega hasta alcanzar su expansión total y puede despegar. El cabo es arriado con un cabrestante hasta alcanzar su altura de operación. El aterrizaje funciona de manera inversa.

La tecnología SkySails puede utilizarse sin problemas en casi todos los tipos de buques. La cometa va conectada al buque por medio de un cabo de remolque especial y es controlada por un ordenador, mediante un módulo automático para optimizar los beneficios del viento. Este sistema permite a la cometa permanecer en la “ventana de potencia” a una altura de entre 100 y 420 metros y realizar trayectorias en forma de ocho, maximizando así la potencia obtenida. El sistema SkySails es automático y requiere sólo una acción mínima de la tripulación. Un sistema de control automático dirige la cometa y ajusta su trayectoria de vuelo. Toda la información relacionada a la operación del sistema se muestra en el monitor de la estación de trabajo SkySails en el puente del buque.

De acuerdo con un estudio<sup>180</sup> de las Naciones Unidas realizado por la Organización Marítima Internacional, podrían ahorrarse cada año hasta 100 millones de toneladas de

<sup>179</sup> Fuente: “SkySails Propulsion System. Turn wind into profit.”

[http://www.skysails.info/fileadmin/user\\_upload/Downloads/EN\\_SkySails\\_Product\\_Brochure.pdf](http://www.skysails.info/fileadmin/user_upload/Downloads/EN_SkySails_Product_Brochure.pdf)

dióxido de carbono ( $CO_2$ ) si se aplicase la tecnología SkySails en la flota mercante mundial. Esta cifra equivaldría al 11 % de las emisiones de Alemania.



**Figura 87: Beluga SkySails<sup>181</sup>**

Cargill es una corporación multinacional privada, con base en Minnesota, dedicada al transporte global de materia prima agrícola, energética e industrial. Aunque no es dueña ni opera buques, su negocio de transporte marítimo fleta buques que mueven más de 185 millones de toneladas de mercancías cada año conectando áreas con exceso de producto con aquellas en las que falta.

Esta corporación ha firmado un acuerdo con el armador/gerente de buques griego Ambros Marítima SA para instalar la cometa más grande del mundo en su buque granelero "M/V Agia Marina". Este buque normalmente transporta cargamentos de materias primas agrícolas e industriales. El carguero de 170 metros de eslora, que fue construido en 1994, tiene una velocidad de servicio de hasta 14 nudos y puede transportar cerca de 28.500 toneladas de cargas secas a granel en un momento dado, por lo que es el mayor buque con la utilización de la tecnología de la energía eólica creada por SkySails GmbH.

En diciembre del 2011 Cargill instalará la cometa de  $320 m^2$  en el buque, con lo que está ayudando a la empresa SkySails a desarrollar y probar la tecnología apoyando así la gestión ambiental en la industria. Bajo los términos del acuerdo, la cometa será instalada a bordo del Aghia Marina en el primer trimestre del 2012, y estará completamente operativa unas semanas después. Ambros se ha unido a Cargill y a SkySails en el desarrollo y prueba de la nueva tecnología.

<sup>180</sup> Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, pg. 271 ff

<sup>181</sup> Fuente: <http://www.beluga-racer.com/wp-content/uploads/2008/10/beluga-skysails.jpg>



**Tabla 10: Áreas de las cometas asumidas para 2020 en los diferentes tipos de buque.<sup>182</sup>**

Hasta el año 2008, las cometas de remolque tenían superficies de unos  $640 \text{ m}^2$  para buques de carga, pesqueros y yates. Estos sistemas habían sido instalados en 3 buques: un buque de prueba y dos buques comerciales, ambos multipropósitos de carga. Aunque se han planeado<sup>183</sup> cometas con un área de hasta  $5000 \text{ m}^2$ .

Existe un estudio de la IMO que asume que en 2020, estarán disponibles en el mercado cometas de hasta  $5000 \text{ m}^2$ . En la siguiente tabla se muestran superficies que se aplicarían a los diversos tipos de buques.

Ship type		Kites applied in 2020 ( $\text{m}^2$ )
Crude oil tanker	200,000+ dwt	5,000
Crude oil tanker	120,000–199,999 dwt	2,500
Crude oil tanker	80,000–119,999 dwt	1,280
Crude oil tanker	60,000–79,999 dwt	1,280
Crude oil tanker	10,000–59,999 dwt	640
Crude oil tanker	0–9,999 dwt	160
Product tanker	60,000+ dwt	1,280
Product tanker	20,000–59,999 dwt	640
Product tanker	10,000–19,999 dwt	320
Product tanker	5,000–9,999 dwt	320
Product tanker	0–4,999 dwt	160
Chemical tanker	20,000+ dwt	1,280
Chemical tanker	10,000–19,999 dwt	320
Chemical tanker	5,000–9,999 dwt	320
Chemical tanker	0–4,999 dwt	160
LPG tanker	50,000+ $\text{m}^3$	640
LPG tanker	0–49,999 $\text{m}^3$	320
LNG tanker	200,000+ $\text{m}^3$	1,280
LNG tanker	0–199,999 $\text{m}^3$	640
Other (small)	Other (small)	160
Bulk carrier	200,000+ dwt	2,500
Bulk carrier	100,000–199,999 dwt	2,500
Bulk carrier	60,000–99,999 dwt	1,280
Bulk carrier	35,000–59,999 dwt	640
Bulk carrier	10,000–34,999 dwt	640
Bulk carrier	0–9,999 dwt	160

Es difícil estimar la potencial la reducción el consumo de combustible que supondría el uso de una cometa de remolque, desde que el potencial no depende solo del área de la cometa, sino que también lo hace de la ruta que realiza un buque y de las respectivas condiciones meteorológicas. En la tabla 12 se muestran las potencias equivalentes que se pueden obtener de las distintas cometas en condiciones estándar.<sup>184</sup>

Kite area ( $\text{m}^2$ )	Engine equivalent power under standard conditions (kW)
160	600
320	1,200
640	2,500
1,280	4,900
2,500	9,600
5,000	19,200

**Tabla 11: Potencia aproximada de los kites.<sup>185</sup>**

<sup>182</sup> Fuente: Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, pg. 206.

<sup>183</sup> Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, pg. 206.

<sup>184</sup> Las condiciones estándar están definidas de forma que se considera que el buque navega a 10 nudos, con un viento aparente de  $130^\circ$ , con una velocidad de 25 nudos, y con unas olas de 60 centímetros y maniobrando el kite dinámicamente.

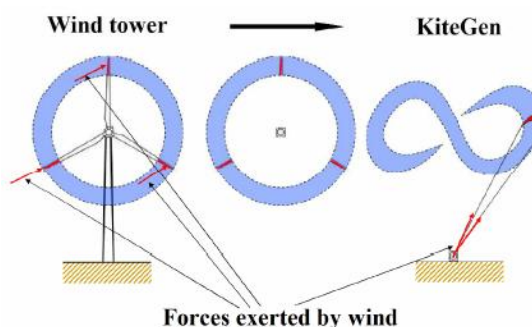
<sup>185</sup> Fuente: Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, pg. 206.



## 7.- Generación Eléctrica Auxiliar.

### 7.1.- Las Cometas.<sup>186</sup>

En la última década, se han llevado a cabo diversas investigaciones y actividades de desarrollo, sobre a las tecnologías de generación eléctrica que tienen el objetivo de convertir la energía del viento en altura en corriente eléctrica, mediante la explotación de vuelos controlados de alas o cometas.<sup>187</sup>



**Figura 88: Energía del viento.**<sup>188</sup>

En el año 2009 Lorenzo Fagiano presentó una tesis sobre el control de cometas para obtener energía del viento en gran altitud.<sup>189</sup>

En el año 2010, L. Fagiano junto con M. Canale y M. Milanese analizaron la aplicación de un generador llamado KE-yoyo a bordo de un buque<sup>190</sup>, con el fin de valorar la energía eólica de gran altitud en el mar.

El objetivo principal del proyecto fue el proporcionar una solución para el suministro de energía eléctrica a bordo de los buques. La energía eólica obtenida por la solución KITVES no se utiliza para la tracción directa del buque, sino que permite el diseño de un nuevo concepto generador eléctrico a bordo, y cuyas capacidades de generación son esencialmente independientes a las condiciones de navegación, permitiendo al barco navegar en cualquier dirección sin poner en peligro la operatividad del sistema.

En un sistema KE-yoyo, la cometa está conectada al buque mediante dos cables realizados a partir de materiales compuestos, con una resistencia de tracción 8-10 veces superior a los cables de acero del mismo peso.

En la cubierta del buque, los cables están enrollados en dos tambores, conectados a dos motores eléctricos que pueden actuar como generadores y como motores eléctricos. La cometa puede ser controlada diferencialmente tirando de los cables con los motores eléctricos y es monitorizada utilizando instrumentación inalámbrica de a bordo (GPS, sensores magnéticos y de inercia) que permiten medir la velocidad del viento y la posición.

<sup>186</sup> "Optimization and control of a hybrid kite boat". Lorenzo Fagiano, Mario Mialese, Valentino Razza. Dipartimento di Automatica e Informatica. Politecnico di Torino, Torino. Italy.

<sup>187</sup> "Estimation of the mechanical energy output of the kite wind generator" I.Argatov, P. Rautakorpi, y R. Silvennoinen. Renewable Energy.

<sup>188</sup> "Control of Tethered Airfoils for High-Altitude Wind Energy Generation" Lorenzo Fagiano, Politecnico di Torino. 2009.

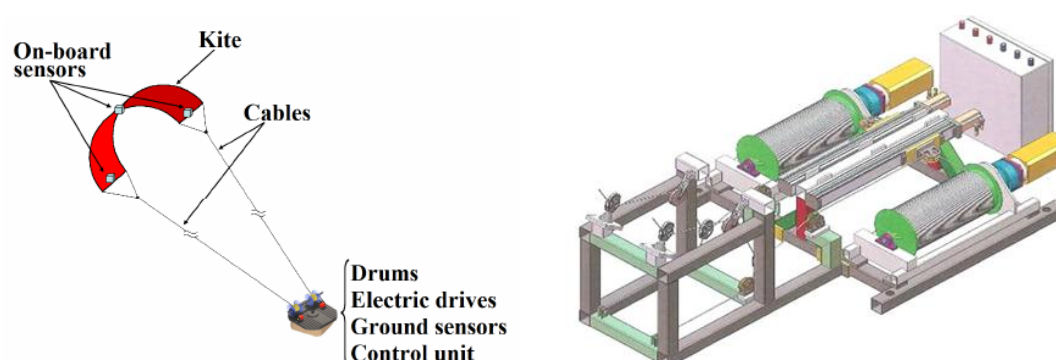
<sup>189</sup> "Control of Tethered Airfoils for High-Altitude Wind Energy Generation" Lorenzo Fagiano, Politecnico di Torino. 2009.

<sup>190</sup> Fuente: "High altitude wind energy generation using controlled power kites." M.Canale, L.Fagiano, y M. Milanese. Control Systems Technology.2010.

Las alas de la cometa están equipadas con sensores que identifican la posición, la orientación y la aceleración de cada una de ellas. Estos datos se transmiten a una unidad de control de los motores, y a través de una cadena cinemática de movimientos y con los dos cables conectados a las alas, los motores pueden controlar el vuelo de las alas. Los motores están equipados con unidades de doble efecto, de manera que los mismos motores pueden funcionar como generadores.

Otros sensores instalados a bordo del buque, miden la corriente generada, la fuerza del cable, la longitud, la velocidad del viento y su dirección.

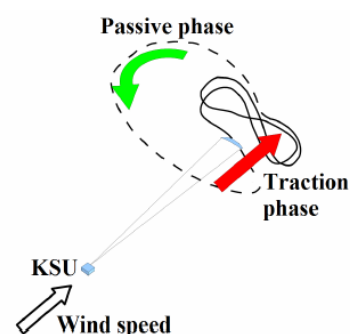
El sistema para controlar la cometa se llama Kite Steering Unit y está compuesto por dos motores eléctricos, dos tambores, y el hardware necesario.



**Figura 89: Unidad de gobierno de la cometa.**<sup>191</sup>

La energía eléctrica es generada repitiendo continuamente un ciclo de dos fases: en la fase de tracción la cometa es controlada para volar rápido con el viento de transversal, y los cables son desenrollados a una velocidad referencia, bajo la estirada de las elevadas fuerzas de tracción, y generando electricidad a través de los motores eléctricos.

La unidad de gobierno de la cometa es capaz de realizar un ciclo de dos fases maniobrando la matriz de las alas, de forma que simplemente actúa sobre las dos líneas que conectan la matriz alas a la unidad de dirección fija. Las líneas están conectadas a dos alterno-motores por medio de tambores enrollados. En la fase de tracción, cuando la matriz de las alas es levantada por el viento (debidamente conducido de la manera más eficiente por el control), las líneas se desenrollan, los tambores son puestos en rotación y los alterno-motores generan la energía.



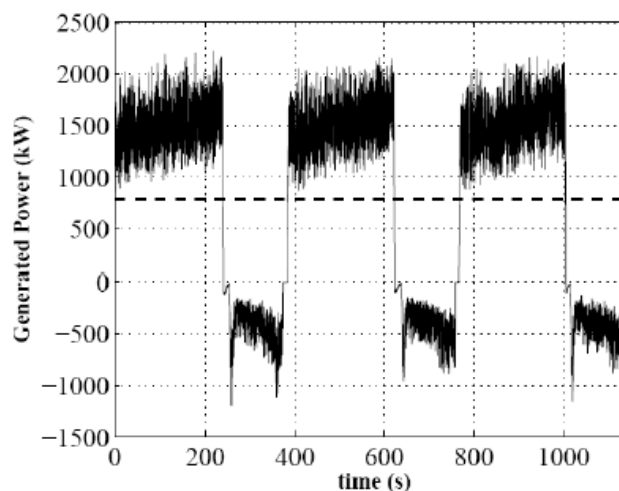
**Figura 90: Fases del vuelo**<sup>192</sup>

<sup>191</sup> Fuente: "Control of Tethered Airfoils for High-Altitude Wind Energy Generation" Lorenzo Fagiano, Politecnico di Torino. 2009.

<sup>192</sup> Fuente: "Control of Tethered Airfoils for High-Altitude Wind Energy Generation" Lorenzo Fagiano, Politecnico di Torino. 2009.

Cuando se alcanza la longitud máxima de las líneas, el control entra en la fase de recuperación, donde se conduce la cometa a una región donde las líneas pueden ser arrastradas por los motores con un menor esfuerzo, hasta que se alcanza longitud mínima. Perdiendo así una pequeña parte de la energía generada en la fase de tracción, se lleva a cabo de nuevo otra fase de tracción.

Como se puede observar en la figura 91, la energía necesaria para recoger las líneas en la fase pasiva únicamente supone un 15% de la energía generada en la fase de tracción.



**Figura 91: Energía generada por una cometa KitVes.**<sup>193</sup>

<b>Tabla 12: Características de la cometa Kitves</b>	
Masa	50 kg
Área	100 m <sup>2</sup>
Diámetro de la línea	0,025 m
Densidad de la línea	970 kg·m <sup>3</sup>
Angulo de ataque	3,5º
Densidad del Aire	1,2 kg·m <sup>3</sup>

El sistema controlado no es lineal, es inestable (en ausencia de control de realimentación), y está sujeto a perturbaciones significativas debido a la turbulencia del viento. Por lo tanto, una estrategia innovadora de control, llamada de modelos de predicción control no lineal<sup>194</sup>, ha sido probada, para hacer frente a la complejidad del sistema de control y para satisfacer las restricciones de seguridad y operacionales.

Esta estrategia se basa en la solución online de problemas de optimización no lineales, que implican el comportamiento predicho del sistema.

El sistema de control de alto nivel de KitVes ha sido diseñado para que la cometa realice un óptimo ciclo de trabajo. El control de alto nivel tiene dos objetivos: el primero es el de maximizar la velocidad del buque a lo largo de la ruta deseada, y el segundo el generar la potencia eléctrica para el uso abordo. El control de alto nivel calcula los valores de “longitud diferencial” y de “velocidad” de las líneas, en base a la: ruta deseada; la energía eléctrica requerida a bordo; las mediciones actuales de velocidad y de dirección del viento, y la posición y velocidad de la cometa. El control de bajo nivel recibe las referencias de las de alto nivel y genera las órdenes de gobierno a fin de lograr la acción prescrita sobre las líneas de la cometa.

<sup>193</sup> Fuente: KitVes Project. “Controlled airfoils for vessel on-board energy production”. Mario Milanese and Lorenzo Fagiano. OPTEC, Katholieke Universiteit Leuven, May 26, 2009.

<sup>194</sup> Non-linear Model Predictive Control (NMPC)

## 7.2.- Las turbinas eólicas.

La potencia disponible del viento que pasa perpendicularmente a través de un área circular es:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot V^3 \quad [22]$$

Esta expresión nos indica que la potencia eólica disponible es proporcional a la densidad del aire, al área expuesta perpendicularmente al flujo de viento y al cubo de la velocidad del mismo. La potencia eólica disponible es la máxima potencia que podría extraerse al viento si se pudiese convertir toda su energía cinética en energía útil. La máxima potencia eólica aprovechable se define por la ley de Betz.

La ley de Betz fue formulada por el físico alemán Albert Betz, en 1919. Con ella definió la potencia captada por un obstáculo que frena el libre movimiento del viento. Por clara conveniencia se puede considerar un aerogenerador como un obstáculo, de modo que la potencia captada por el aerogenerador se definiría como la diferencia instantánea de la energía cinética del viento antes y después de pasar por el mismo en un determinado intervalo de tiempo.

Definió la relación aproximada tal como aparece en la siguiente ecuación, que define la Ley de Betz, que representa la máxima cantidad de energía del viento que se puede transformar en energía rotacional:

$$P_{mec} = 0.593 \cdot P_{viento} \quad [23]$$

Como no se puede convertir toda la energía cinética del viento en energía rotacional, este límite se ve disminuido por varios elementos que conllevan distintas pérdidas en el proceso de conversión de energía eólica en energía eléctrica, por lo que nos lleva a aplicar un coeficiente de rendimiento  $C_p$  que básicamente se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_{mec} = C_p \cdot P_{viento} \quad [24]$$

$$P_{mec} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad [25]$$

El coeficiente  $C_p$  no supera el límite de Betz, no es constante, y varía con la velocidad del viento, la velocidad angular de la turbina y con el ángulo de ataque de los alerones para los que poseen esta característica. Todo lo anterior depende fuertemente del bloqueo que el aerogenerador genera sobre el flujo de aire. Los coeficientes de rendimiento actuales son menores que este límite debido a varias pérdidas aerodinámicas y mecánicas.

### 7.2.1- Aerogeneradores de eje horizontal.<sup>195</sup>

Un aspecto tentador de la propulsión mediante turbinas eólicas es que pueden proporcionar fuerza propulsiva cuando se navega directamente contra el viento, lo que es imposible con los otros medios de propulsión a viento.

La altura, o francobordo, es un factor limitador tanto para las turbinas eólicas como para buques con velas convencionales o rígidas, ya que los puentes que cruzan los acercamientos desde el mar a los mayores puertos del mundo, lo limitan a unos 60 metros, a menos que la torre de la turbina eólica, velas tipo ala o mástiles puedan ser estibados sobre cubierta. Esto significa que para un buque de 150 metros propulsado con turbina eólica, el diámetro de un aerogenerador no plegable de eje horizontal sobre la cubierta está limitado a unos 40 metros, considerando el francobordo y una distancia de seguridad desde las palas de la hélice a la cubierta.

A partir de la teoría del momento axial, se han diseñado unas turbinas eólicas optimizadas para la propulsión de buques, que comparado con las turbinas convencionales, están diseñadas para maximizar la potencia extraída.

#### 7.2.1.1.- Ahorros de combustible para un buque con turbina eólica en una ruta concreta.

Hay un estudio<sup>196</sup> que analiza la aplicación de una turbina eólica de eje horizontal de 4 palas y 39 metros de diámetro, para complementar la propulsión de un buque en una ruta de ida y vuelta, de Peterhead a Bremerhaven. La ruta la eligieron por la numerosa información disponible sobre las condiciones meteorológicas de la zona. A partir de las estadísticas de los vientos a 10 metros sobre el nivel del mar, se calculó la velocidad del viento a la altura que se encuentra el aerogenerador. A 39,5 metros sobre el nivel del mar.

La potencia neta se define como la potencia generada por el aerogenerador menos la requerida para contrarrestar la fuerza hacia atrás sobre el disco formado por el rotor de la turbina, y puede calcularse multiplicando la fuerza neta con la velocidad del buque y dividiendo por el factor de eficiencia  $\zeta_2$ , que tiene en cuenta las pérdidas desde la máquina hasta el propulsor, y las propias pérdidas del propulsor.

La energía total ahorrada utilizando el diseño optimizado de las palas, para ángulo de viento aparente de 0 grados y viento de 10 m/s, cuando se ajusta el nivel de rotación de la turbina y el ángulo de las palas, es de 40.630kWh. Esto supone un 33,1 % de la energía total necesaria, incluyendo un 15% de margen de mar.

---

<sup>195</sup> "Wind Turbine Propulsion of Ships." Eirik Bøckmann, Sverre Steen. Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway. Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, June 2011

<sup>196</sup> "Wind Turbine Propulsion of Ships." Eirik Bøckmann, Sverre Steen. Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway. Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, June 2011

Con el fin de estudiar el efecto de optimizar el diseño de una turbina eólica para un diámetro determinado, se han hecho cálculos similares para la instalación de una turbina eólica convencional tipo Vestas V39/600 a bordo del buque. Estas tienen un rotor de 39 metros de diámetro y pueden generar hasta 600kW de potencia.



**Figura 92: Ilustración de una turbina eólica Vestas V39/600 a bordo de un buque tanque para generación eléctrica.<sup>197</sup>**

Se calculó la fuerza neta a partir de la potencia generada por la turbina menos la potencia necesaria para remontar vientos de 10 nudos. Empleando la turbina Vestas V39/600 a bordo del buque en la ruta analizada, el resultado de la energía total ahorrada era de 24,4%, comparado con el 33,1% que ofrece el aerogenerador de diseño optimizado.

La turbina eólica optimizada proporciona un mayor empuje neto hacia adelante que la Vestas V39/600, no porque el empuje es menor, sino porque la potencia es bastante mayor. Esto podría resultar contra intuitivo desde que la turbina se ha optimizado para proporcionar una máxima  $F_{net}$  y no máxima potencia, pero es debido al hecho de que la turbina de diseño optimizado está diseñada para operar con vientos aparentes de mayor intensidad que la turbina Vestas V39/600.

#### 7.2.1.2.- Comparación de aerogeneradores de eje horizontal con velas tipo ala.

Los ahorros de combustible sujetos a un buque en navegación de  $30.598 m^3$  de desplazamiento, con una turbina optimizada se han comparado con los de un buque de las mismas dimensiones utilizando velas tipo ala en vez de una turbina eólica para la propulsión auxiliar. El área máxima<sup>198</sup> posible para un buque en particular es:

$$SA = K \cdot D^{2/3} \quad [26]$$

<sup>197</sup> Fuente: "Wind Turbine Propulsion of Ships." Eirik Bøckmann, Sverre Steen. Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway. Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, June 2011

<sup>198</sup> Asker, G. C. F. (1985). 'Roller Furling Genoa and Rigid Surface Wingsail, a Flexible Practical Wind-Assist System for Commercial Vessels'. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 20:61–81.

Donde  $D$  es el volumen del desplazamiento del buque, y  $K$  es una constante que tiene un valor de 3,2 para las velas rígidas. Utilizando esta ecuación, la máxima superficie vélica permisible para el buque propuesto es de  $3130,5 \text{ m}^2$ .

Con el fin de comparar la fuerza propulsiva del buque equipado con velas rígidas con el equipado con una turbina eólica, se ha elegido un área similar para las velas rígidas que al área del disco formado por el rotor de la turbina eólica. Con diez velas tipo ala semi-elípticas con una longitud de cuerda de 6,08 metros y 25 de altura, el área total de las mismas sería  $1194,1 \text{ m}^2$ , lo que aproximadamente es igual a la superficie del disco generado al rotar la turbina eólica, y además se encuentra por debajo el límite máximo de superficie vélica.

Para las mismas condiciones de viento, el momento escorante de la vela tipo ala sobre el centro de gravedad del buque es de 4,20 MNm, para un ángulo de ataque de  $13,8^\circ$ . Un momento escorante extremo podría ocurrir si esta vela es colocada para navegar remontando el viento, y la dirección del viento cambia de repente a 20m/s por el través, las velas deben ser giradas rápidamente ya que el ángulo de ataque es  $90^\circ$ . En este caso el momento escorante sería tan alto como 116 MNm, afortunadamente por un corto periodo de tiempo si el sistema de posicionamiento automático de las velas rígidas funciona correctamente. Por tanto podría decirse que nunca ocurrirán momentos escorantes tan elevados en un buque con turbina eólica.

El momento adrizante depende proporcionalmente de la densidad del agua de mar  $\rho_{mar}$ , del desplazamiento del volumen sumergido  $\nabla$ , de la distancia del dentro de gravedad al metacentro  $GM$ , y del seno del ángulo de escora del buque  $\Phi$ :

$$M_{adriz} = \rho_{mar} \nabla g G M \sin \Phi \quad [27]$$

Este estudio llegó a la conclusión de que un buque tanque de 150 metros de eslora, navegando en la ruta de Peterhead - Bremaarhaven – Peterhead, en enero, y navegando a diez nudos ahorraría un 24,4% del combustible total utilizando Vestas V39/600 para la generación de energía auxiliar. Optimizando el diseño de la turbina eólica para la propulsión de buques mientras se mantiene el diámetro en 39 metros, los ahorros de combustible aumentan a un 33,1%. Montando velas tipo ala en el buque de la misma área que el disco rotor de la turbina resultaría en un ahorro de 31,8% a una velocidad del buque de 10 nudos.

<b>Tabla 13: Ahorros con turbinas eólicas y velas tipo ala.</b>	
	$V_b = 10$ nudos
Vestas V39/600	24,4%
Turbina eólica con diseño optimizado	33,1%
Velas tipo ala	31,8%

La energía ahorrada por parte de un aerogenerador con diseño optimizado sería de 40,630 kWh, mientras que con Vestas V39/600 sería de 30,019 kWh y con velas tipo ala de 39,023 kWh.



### 7.2.2.- Aerogeneradores de eje vertical.<sup>199</sup>

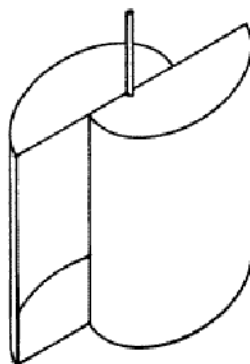
Las turbinas eólicas de eje vertical son unos aerogeneradores que giran sobre un eje vertical, de modo que a diferencia de las turbinas de eje horizontal, no tienen que orientarse al viento para aprovechar su energía cinética, por lo que podría decirse que son omnidireccionales.

Una de las ventajas de este tipo de diseño es que no hacen ruido y no crean muchos esfuerzos de estrés sobre los soportes que los soportan.

En cuanto a las desventajas podría decirse que tienden a ser menos eficientes y que están en fase de desarrollo, por lo que algunos diseños han llegado a sufrir fallos estructurales relacionados con la fatiga, en el caso de grandes instalaciones en tierra firme.

Existen diversos tipos de aerogeneradores de eje vertical:

a) El modelo de rotor Savonius es el más simple, ya que consiste en un cilindro hueco partido por la mitad, en el cual sus dos mitades han sido desplazadas para convertirlas en una S, de modo que las partes cóncavas de la S captan el viento, mientras que los reversos presentan una menor resistencia al viento, por lo que giran en el sentido que menos resistencia ofrece. Este sistema tiene el inconveniente de presentar una sobre presión en el interior de las zonas cóncavas al no poder salir el aire, perjudicando el rendimiento, por lo que el sistema queda mejorado si se separan ambas palas y se deja un hueco entre ambas para que exista un flujo de aire.



**Figura 93: Rotor Savonius<sup>200</sup>**

Debido a la gran resistencia al aire que ofrece este tipo de rotor, solo puede ser utilizado a bajas velocidades. El uso para generación de energía eléctrica precisaría de multiplicadores de giro que reducirían el rendimiento.

<sup>199</sup> "Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje vertical" Juan Cristobal Antezana Nuñez. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Dpto. de ingeniería eléctrica. Sept 2004.

<sup>200</sup> Fuente: "Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje vertical" Juan Cristobal Antezana Nuñez. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Dpto. de ingeniería eléctrica. Sept 2004.

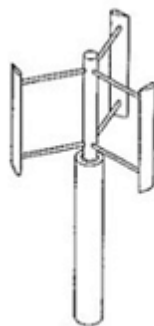


b) El rotor Darrieus es el modelo que fue patentado por G.J.M. Darrieus en 1931, y el más popular de los aerogeneradores de eje vertical. Nació por la necesidad de evitar la construcción de hélices sofisticadas como las que se utilizan en los aerogeneradores de eje horizontal. Permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, pero no alcanza las de un rotor de eje horizontal. Este rotor consta de unas finas palas con forma de ala de avión simétricas, que están unidas al eje solo por los extremos, con una curva especial diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje.

Este rotor presenta el problema que no puede arrancar por sí mismo, teniendo que emplearse un sistema de arranque secundario para empezar a rotar, aunque una vez en marcha es capaz de mantenerse gracias a la aerodinámica de sus palas. Por esta razón, muchas veces se combina el diseño de este aerogenerador, con rotores Savonius para facilitar su partida.



**Figura 94: Rotor Darrieus<sup>201</sup>**



**Figura 95: Rotor Darrieus H<sup>202</sup>  
Helicoidal<sup>203</sup>**



**Figura 96: Rotor**

c) La patente de Darrieus también cubrió las turbinas con alerones verticales de eje recto llamadas Giromills. Una variante del Giromill es la Cycloturbine, con alerones orientados mecánicamente para cambiar el ángulo de ataque. Este tipo de turbina fue investigada por el NREL.<sup>204</sup>

A excepción del rotor Darrieus, los aerogeneradores de eje vertical operan con vientos de baja velocidad donde difícilmente superan las 200 RPM y se emplean para generar potencias que van de los 200 W a los 4 MW. Generalmente se caracterizan por tener altos torques de partida, aunque el Darrieus es una excepción.

<sup>201</sup> Fuente: "Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje vertical" Juan Cristobal Antezana Nuñez. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Dpto. de ingeniería eléctrica. Sept 2004.

<sup>202</sup> Fuente: "Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje vertical" Juan Cristobal Antezana Nuñez. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Dpto. de ingeniería eléctrica. Sept 2004.

<sup>203</sup> Fuente: "Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje vertical" Juan Cristobal Antezana Nuñez. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Dpto. de ingeniería eléctrica. Sept 2004.

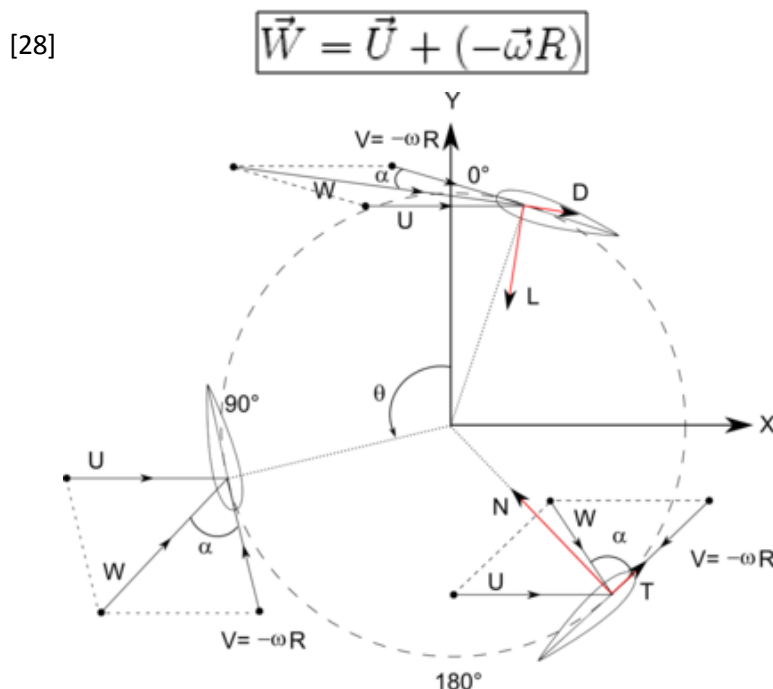
<sup>204</sup> National Renewable Energy Laboratory  
Proyecto Final de Carrera

En el Anexo H se muestran los coeficientes de rendimientos de diversos tipos de aerogeneradores de eje vertical, en función de la relación de velocidad tangencial  $\lambda$ , de modo que se puede valorar la velocidad de trabajo para cada valor del coeficiente de rendimiento.

Para un determinado diseño de turbina, el valor del  $C_p$  viene dado en función de su relación de velocidad  $\lambda$ . Existe una relación de velocidades para la cual la captación de energía es máxima. Las turbinas Darrieus y las turbinas de eje horizontal tienen similares valores del máximo coeficiente de rendimiento, pero las turbinas de eje horizontal pueden operar a mayores relaciones de velocidad

### 7.2.2.1.- Principios Aerodinámicos de las turbinas eólicas de eje vertical.<sup>205</sup>

Las fuerzas y las velocidades que actúan sobre una turbina de eje vertical están representadas en la figura 97. Siendo el vector de la velocidad  $\vec{W}$  el resultado de la suma vectorial de la velocidad del aire  $\vec{U}$ , y del vector velocidad de la pala avanzando  $(-\vec{\omega} \cdot r)$ .



**Figura 97: Fuerzas y velocidades que actúan sobre una turbina de eje vertical.<sup>206</sup>**

El ángulo de ataque  $\alpha$  es el ángulo entre la velocidad del viento aparente  $W$  y la cuerda de la pala. El flujo de aire resultante crea un ángulo de ataque positivo variante en la zona de barlovento del aparato y cambiando el signo en la zona de sotavento. Desde las consideraciones geométricas, la velocidad del flujo de aire resultante y el ángulo de incidencia se calculan del siguiente modo:

<sup>205</sup> The Energy Network. Energia Power.

<http://energiapower.com/energiashop/pages.php?pageid=3&mode=preview>

<sup>206</sup> Fuente: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/Forces\\_and\\_velocities.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/Forces_and_velocities.png)

Donde relación de velocidad tangencial  $\lambda$ , es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto de la turbina, y sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se suele llamar velocidad específica<sup>207</sup>. Esta relación viene dada por la proporción entre la velocidad rotacional de las palas de la hélice y la velocidad del viento actual. La proporción de las velocidades se relaciona con la eficiencia, de modo que se puede mejorar variando el diseño de la pala. Una mayor proporción en esta relación supone mayores niveles de ruido y requiere palas más fuertes para resistir las mayores fuerzas centrífugas.

La velocidad de una pala puede ser calculada mediante la multiplicación de la velocidad rotacional del rotor  $\Omega$  en radianes por el radio del rotor en metros.

La fuerza aerodinámica resultante se puede descomponer tanto en sus componentes de sustentación y resistencia aerodinámica como en sus componentes normales y tangenciales. Se considera que las fuerzas actúan a  $\frac{1}{4}$  de la cuerda desde el ángulo de ataque, con el fin de minimizar el momento de cabeceo. La fuerza tangencial actúa a lo largo de la velocidad de la pala, y así, empuja las palas alrededor, y la fuerza normal actúa radialmente y consecuentemente a través de los rodamientos. Los coeficientes de sustentación y resistencia aerodinámica generalmente son normalizados por la presión dinámica del flujo de viento relativo, mientras que los coeficientes normal y tangencial suelen ser normalizados por la presión dinámica de la velocidad del viento entrante ininterrumpido.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho S W^2} ; C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho S W^2} ; C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho S U^2} ; C_N = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho S U^2}$$

[28]

[29]

[30]

[31]

---

<sup>207</sup> Tip Speed Ratio

### 7.2.2.2.- Aplicaciones actuales a bordo de buques.

En Junio de 2011, se instalaron dos aerogeneradores de eje vertical sobre la proa del buque “M/V Stena Jutlandica”<sup>208</sup>, un ferry local de Gotteborg en Suecia, de una de las mayores compañías de ferrys del mundo en cuanto a tráfico internacional Stena Line’s que está aumentando sus esfuerzos ambientales.



**Figura 98: Buque Stena Jutlandica con dos aerogeneradores de eje vertical en la proa.**<sup>209</sup>

El objetivo del proyecto fue el del aprovechamiento de las fuerzas del viento saliente de las turbinas para mejorar la eficiencia aerodinámica total del buque. Las simulaciones CFD mostraron que el coeficiente de resistencia aerodinámica total del buque, decreció de 0,56 a 0,51 con las turbinas instaladas abordo. Además, se espera que la energía proporcionada por los aerogeneradores suponga un ahorro de combustible a la hora de suministrar los sistemas eléctricos auxiliares de abordo, además de reducir significativamente los costes energéticos del buque cuando está atracado.

Estas turbinas tienen una altura de 4,4 metros y cuando el viento incide a una velocidad de 3,5 m/s el viento saliente puede llegar a desplazarse a una velocidad de 30m/s. Las dos turbinas generarán unos 23.000kW al año.

La reducción de la resistencia aerodinámica del buque en el mar, resultará en una disminución del consumo de combustible entre 80 y 90 toneladas al año, lo que supondría una reducción de las emisiones de dióxido de carbono en 269 toneladas al año y de 1,7 toneladas al año en emisiones de sulfuros.

<sup>208</sup> [http://www.energyinsight.info/wind\\_power\\_ferry.html](http://www.energyinsight.info/wind_power_ferry.html)

<sup>209</sup> Fuente: [http://www.instablogsimages.com/1/2011/06/28/stena\\_jutlandica\\_ufmel.jpg](http://www.instablogsimages.com/1/2011/06/28/stena_jutlandica_ufmel.jpg)

Se ideó un sistema especial para montar de forma segura las dos turbinas en la cubierta del buque, de forma que los reducidos niveles de ruido y la escasez de vibraciones permitieron instalar las dos turbinas en la proa, delante de un salón de pasajeros cerrado con cristales.

Las turbinas eólicas fueron compradas a una nueva compañía de Nueva York llamada Urban Green Energy, que construye turbinas eólicas de eje vertical especialmente diseñadas para tomar ventaja de los cambios en los flujos del viento a niveles cercanos a superficies.



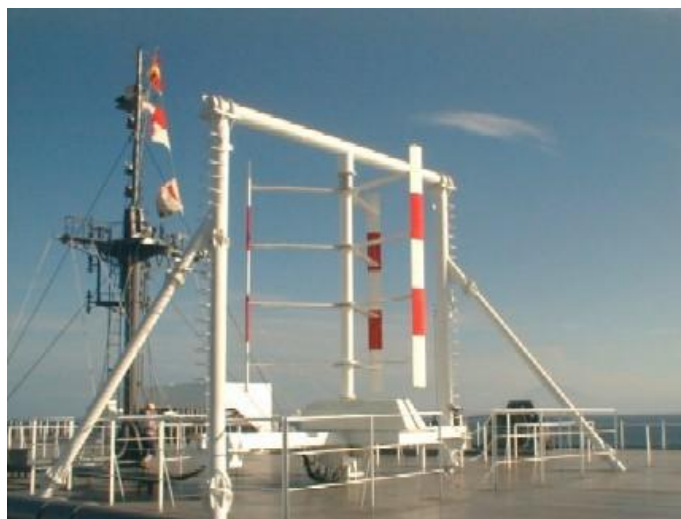
**Figura 99: Curva de potencia de las turbinas eólicas de eje vertical UGE-4K.**<sup>210</sup>

Actualmente los buques de la compañía Stena operan en el Mar del Norte y el Mar Báltico, dos zonas en las que se limitan las emisiones de sulfuro.

Hay que tener en cuenta que la instalación de un aerogenerador de eje vertical a bordo de buques, con la intención de generar electricidad a partir de la fuerza del viento, requiere la verificación de la resistencia aerodinámica total del buque, antes y después de la instalación, ya que en caso de incrementar supondría un aumento del consumo del combustible, debido al aumento de energía necesaria para propulsar el buque.

Aunque cuando el buque se encuentra detenido, ya sea atracado en puerto o fondeado en el mar, los aerogeneradores de eje vertical pueden suponer una gran solución para obtener energía a partir del viento, ya que no tienen que orientarse al viento, aunque no logran proporcionar potencias tan elevadas como los aerogeneradores de eje horizontal.

<sup>210</sup> Fuente: [http://www.verticalgreenenergy.co.za/graphics/uge4k\\_power-450x333.jpg](http://www.verticalgreenenergy.co.za/graphics/uge4k_power-450x333.jpg)



**Figura 100: NYK Line's car carrier "Andromeda Leader".<sup>211</sup>**

Aunque también se puede llegar a dar la situación de que haya empresas que instalen estos sistemas con el fin de reducir las emisiones, y que al final quizás no sea así, debido a que si un buque está siempre en navegación, y el uso del sistema aumenta la resistencia aerodinámica total del buque, no supondría en ningún caso un ahorro de combustible ni de emisiones.

Otros sistemas también se han conectado a baterías de hidrógeno, de modo que la electricidad generada por el sistema, se almacene para su próximo uso en otro momento. Esta solución puede ser muy interesante para la instalación a bordo de buques oceanográficos o plataformas off shore que estén fondeados mucho tiempo en una zona concreta, de modo que podrían obtener energía adicional a partir del viento.



**Figura 101: Hydrogen Challenger.<sup>212</sup>**

<sup>211</sup> Fuente: Kawasaki. Operational Test Starts on Straight-Wing Vertical Axis Wind Turbine Generator System. 24 Aug 2004 <http://www.khi.co.jp/english/news/detail/ba0412-02.html>

<sup>212</sup> Fuente: [http://seriouslygoodnews.com/wp-content/uploads/2010/02/Hydrogen-challenger\\_hg.jpg](http://seriouslygoodnews.com/wp-content/uploads/2010/02/Hydrogen-challenger_hg.jpg)  
Proyecto Final de Carrera                      Licenciatura en Náutica y Transporte Marítimo



## 8.- Análisis de los vientos en una ruta predeterminada por el Atlántico Norte.

Hasta hace poco tiempo, el conocimiento de los vientos globales ha estado limitado por determinadas observaciones “in situ” tomadas desde boyas fijas o buques en navegación. Pero hoy en día existen sistemas satelitales que permiten un muestreo espacial de alta resolución y un muestreo temporalmente frecuente de la superficie de los océanos como el Quick Scatterometer (QuickSCAT) de la Agencia Espacial Americana NASA. Se han muestreado aproximadamente el 90% de los vectores de vientos oceánicos.<sup>213</sup>

El SeaWinds Scatterometer es un radar microondas de escaneo que usa la retrodispersión electromagnética de la superficie del océano en múltiples ángulos de antena, midiendo la magnitud de tensión del viento en superficie y su dirección. El producto geofísico de scatterometer está calibrado para proporcionar la información del viento a 10 metros sobre la superficie del mar.

La Universidad del Estado de Oregón, nos proporciona la Climatología de los Vientos Globales Oceánicos, es un atlas interactivo basado en web desde el que los usuarios pueden obtener mapas climatológicos de los vientos, así como estadísticas de vientos tanto tabulares como en diagramas polares.<sup>214</sup>

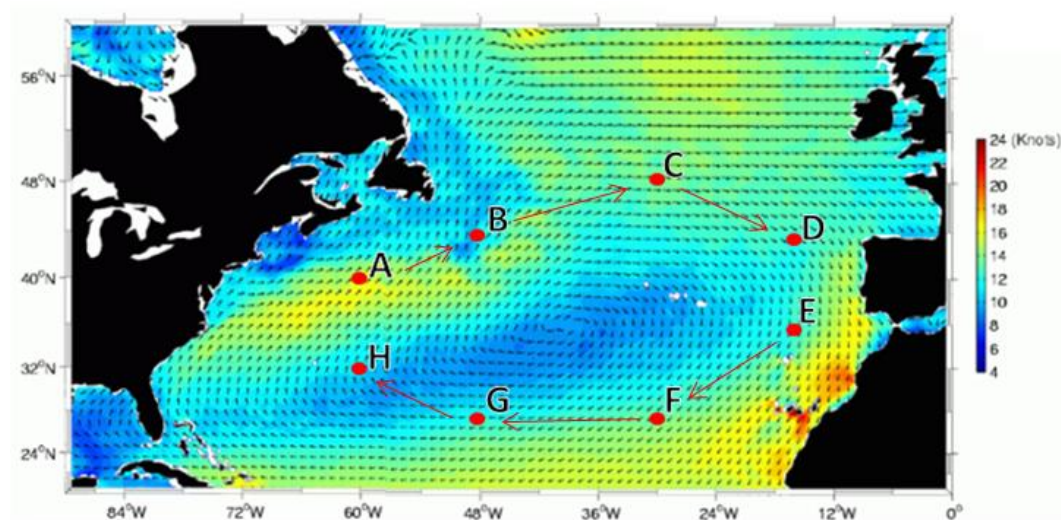


Figura 102: Mapa de los puntos analizados en el estudio de los vientos.<sup>215</sup>

Se ha dividido la ruta propuesta en dos travesías, de modo que la primera será la ruta 1, en la que se navegará hacia el este pasando por los puntos A, B, C, y D. Y en la segunda parte, la ruta 2, se navegará hacia el oeste pasando por los puntos E, F, G y H. Seguidamente, se ha analizado estadísticamente cual es la intensidad y dirección de los vientos en estos 8 puntos, durante 4 periodos de quince días en los meses de enero, abril, julio y octubre. Con esto podremos hacernos una idea de cuáles son los vientos predominantes en cada zona.

<sup>213</sup> [http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/cogow\\_user\\_manual.pdf](http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/cogow_user_manual.pdf)

<sup>214</sup> Climatology of Global Ocean Winds. (COGOW). <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

<sup>215</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>



En la tabla 14, se muestran los rumbos que tendría que tomar un buque, para navegar por la ruta prevista pasando por los puntos establecidos en la figura 101.

<b>Tabla 14: Rumbos establecidos para cada fase de la ruta</b>			
	Latitud	Longitud	Rumbo
Punto A	40° N	60° W	$R_{AB} = 62^\circ$
Punto B	44° N	48° W	$R_{BC} = 66^\circ$
Punto C	48° N	30° W	$R_{CD} = 105^\circ$
Punto D	44° N	15° W	
Punto E	36° N	18° W	$R_{EF} = 252^\circ$
Punto F	32° N	30° W	$R_{FG} = 252^\circ$
Punto G	28° N	42° W	$R_{GH} = 289^\circ$
Punto H	32° N	60° W	

Generalmente los sistemas de propulsión eólica pueden aprovechar todos los vientos aparentes menos los provenientes de la proa. Por esta razón, en el estudio de ocurrencia de los vientos se han eliminado las probabilidades de ocurrencia de los vientos desfavorables, con el fin de conocer más concretamente, cual es la probabilidad de aprovechamiento del viento.

Para ello, y sabiendo que en cada tramo de la ruta el buque navega a un rumbo determinado, se ha analizado cuáles son los vientos que más favorecerán a la propulsión eólica, y cuál es la probabilidad de ocurrencia de los mismos.

Se ha considerado como desfavorable, un sector que va desde los 60° por babor hasta los 60° por estribor desde la proa, eliminando así un sector desfavorable de 120° centrado en la proa.

<b>Tabla 15: Sectores favorables del viento en función del rumbo del buque.</b>		
	+ 60 °	- 60 °
$R_{AB} \pm 60^\circ$	122 °	02 °
$R_{BC} \pm 60^\circ$	126 °	06 °
$R_{CD} \pm 60^\circ$	165 °	45 °
$R_{EF} \pm 60^\circ$	312 °	192 °
$R_{FG} \pm 60^\circ$	312 °	192 °
$R_{GH} \pm 60^\circ$	349 °	229 °

Una vez obtenidos estos rumbos, y a partir de la probabilidad de los vientos en cada punto, se han sumado la probabilidad de encontrarse con vientos favorables en cada tramo de la ruta, con el fin de estudiar la viabilidad de los diversos sistemas de propulsión eólica.

### 8.1.- Enero.

A continuación se han obtenido los mapas que proporcionan la media de los vientos que sucedieron durante los primeros quince días de enero, entre los años 2000 y 2009. Esta información nos permita conocer estadísticamente tanto la dirección de los vientos en cada punto de nuestra ruta como sus respectivas intensidades.

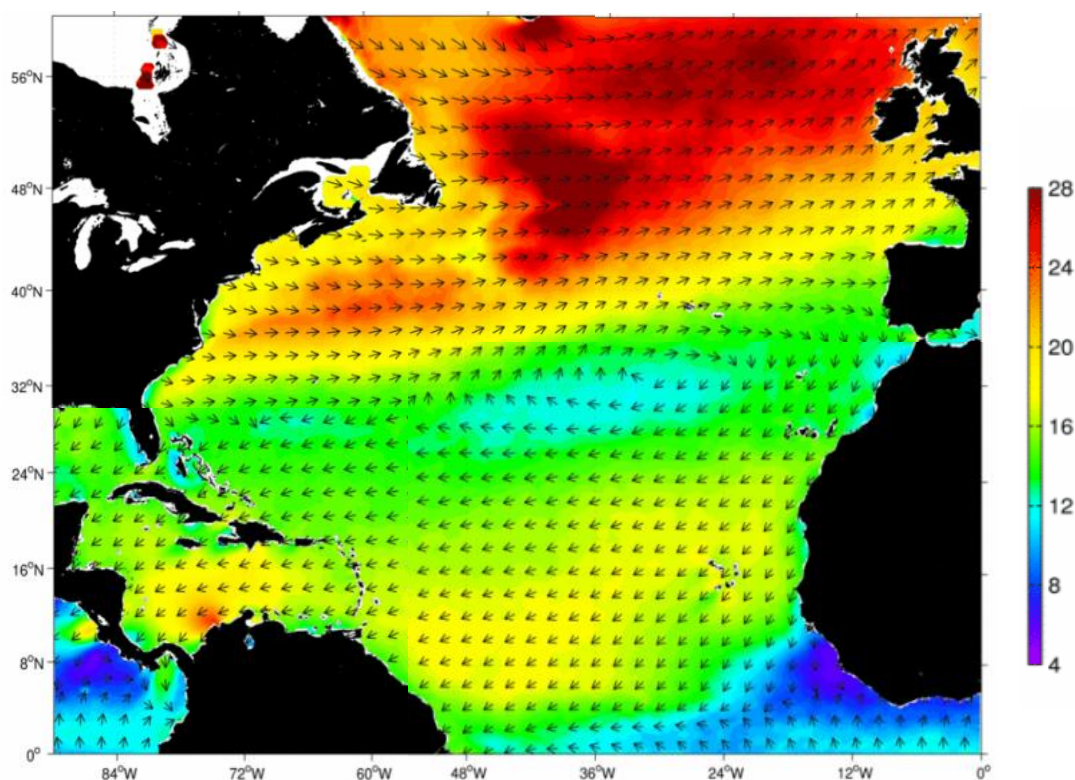
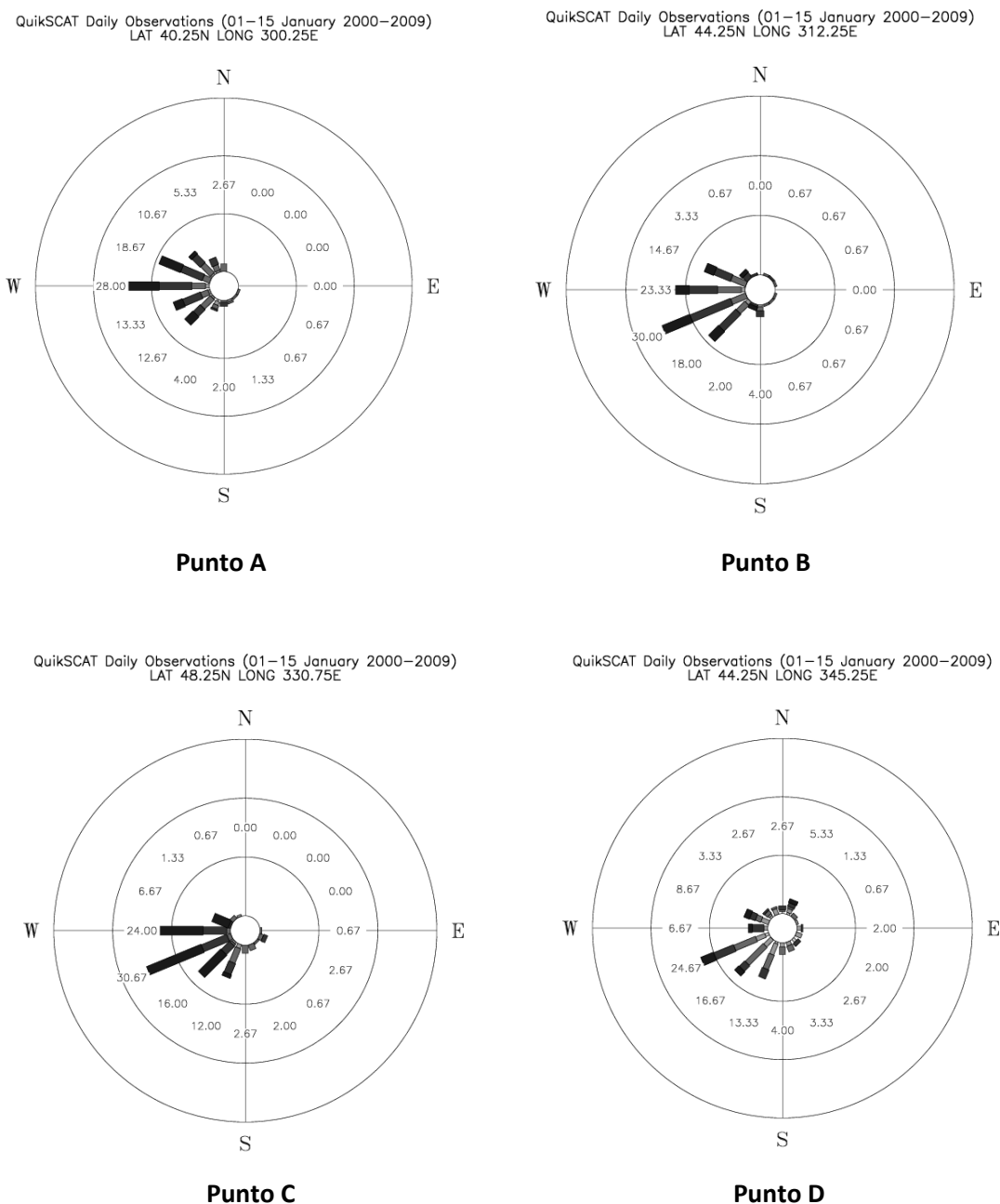


Figura 103: Mapa de dirección e intensidad del viento del 1 al 15 de Enero.<sup>216</sup>

<sup>216</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

**Figura 104: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 1 en Enero.<sup>217</sup>**

Estos diagramas polares son de gran ayuda a la hora de hacer una predicción ya que se hace más fácil la interpretación de las condiciones de los vientos en cada uno de los puntos seleccionados. Los anillos están en intervalos de 20%, las direcciones representan el origen del viento y los diferentes colores y grosores representan las diferentes velocidades del viento.



Rings at 20% intervals  
Total no. of obs. = 150

<sup>217</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

**Figura 104: Leyenda de diagramas polares en nudos.**

Analizando las tablas de estadísticas de los vientos en los diferentes puntos, podremos obtener el porcentaje los vientos que nos favorecen en cada uno de los rumbos de la ruta. Así podremos calcular cual es la probabilidad de encontrar vientos provenientes del sector favorable de nuestro propulsor eólico, de modo que obtendremos una aproximación de cual es el probabilidad de obtener energía del viento en estas rutas durante estas épocas.

En la primera ruta del supuesto, desde el punto A hasta el punto D, tendremos que navegar a 3 rumbos diferentes por 3 zonas. Una vez calculados estos rumbos, podremos obtener cual es la probabilidad de encontrar vientos favorables en cada zona, además de poder clasificarlos en función de sus velocidades. Este proceso se ha realizado para los 4 meses elegidos.

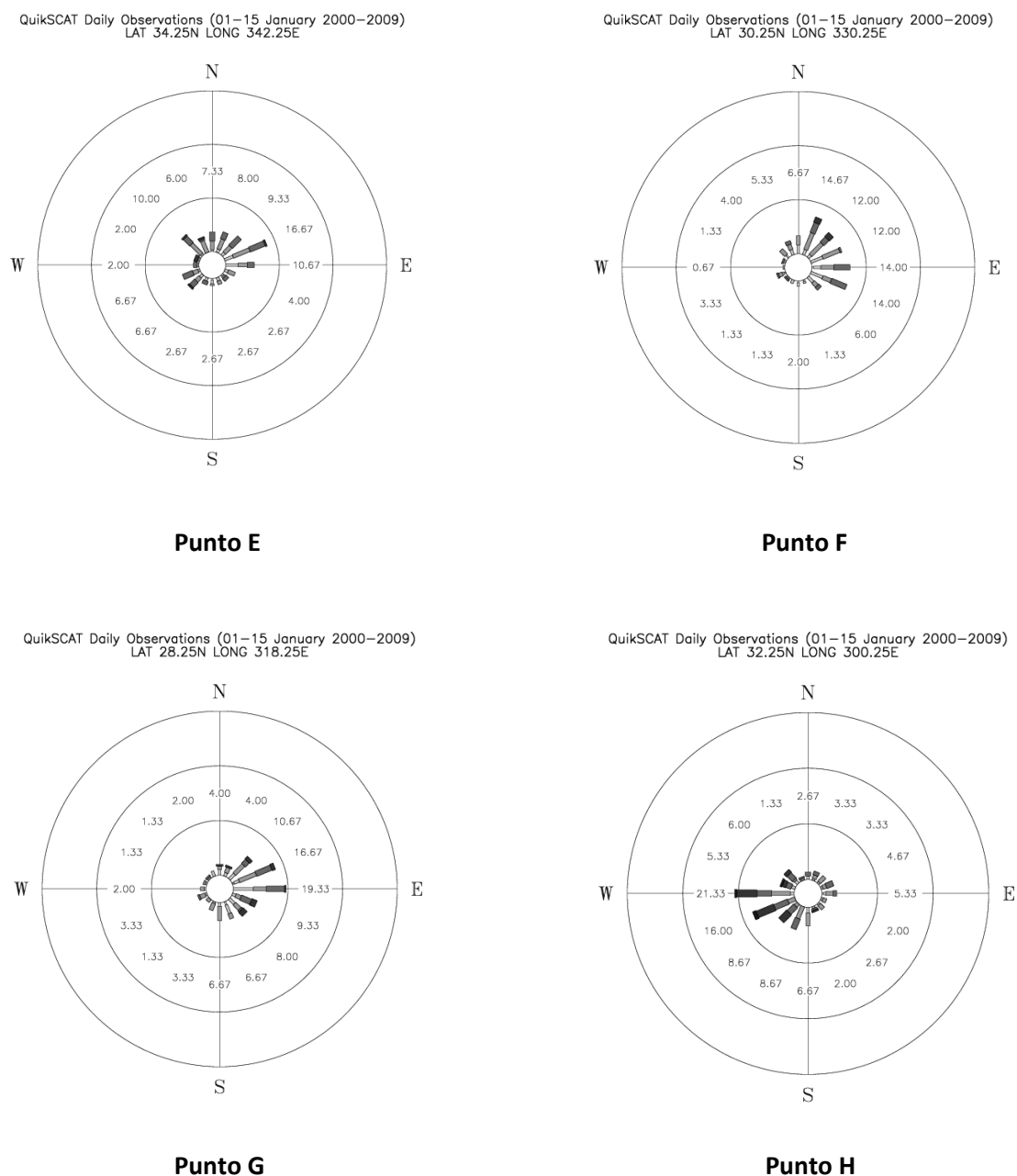
<b>Tabla 16: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 1 en Enero.</b>				
	Total Favorables	Vel $\geq 10$ m/s	Vel $\geq 15$ m/s	Vel $\geq 20$ m/s
$R_{AB} \pm 60^\circ$	96,7 %	96 %	90 %	65,3 %
$R_{BC} \pm 60^\circ$	97,2 %	97,2 %	93,9 %	68,7 %
$R_{CD} \pm 60^\circ$	94 %	94 %	91,3 %	78,67 %
Media	95,96%	95,96%	91,73%	70,89 %

En la primera columna se representa el porcentaje total de todos los vientos favorables para nuestros sistemas de propulsión. La segunda columna generalmente es muy similar a la primera debido a que la mayoría de los vientos que ocurren tienen velocidades superiores a los 10 m/s. En la siguiente columna aparece el porcentaje de los vientos favorables con velocidades superiores a 15 m/s y la última representa los superiores a 20 m/s.

Hay que tener en cuenta, que dentro de la probabilidad de velocidades superiores a 10 m/s se encuentra incluida la probabilidad de velocidades superiores a 15 y 20 m/s respectivamente.

Con esta clasificación se pretende valorar la frecuencia de vientos favorables, con el fin de cuantificar la energía que puede ser aprovechada del viento, para la propulsión de un buque. El hecho de hacer una media del porcentaje de las veces que sucede un viento determinado en una zona, no es del todo incorrecto.

Aunque lo que no puede realizarse de forma tan simple, es la predicción de la ocurrencia de un viento durante toda una ruta, a partir de la media de los porcentajes en cada punto. Actualmente los sistemas meteorológicos disponen de algoritmos muy complejos para predecir las condiciones meteorológicas durante una ruta. En este trabajo, las medias de los porcentajes, es para hacerse una idea general de la magnitud de los vientos en cada zona y época del año, pero en ningún caso supone un cálculo fiable para garantizar la ocurrencia del viento en una ruta completa.

**Figura 105: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 2 en Enero.**<sup>218</sup>**Tabla 17: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 2 en Enero.**

	Total Favorables	Vel $\geq 10 \text{ m/s}$	Vel $\geq 15 \text{ m/s}$	Vel $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{EF} \pm 60^\circ$	80 %	62,67 %	26,67 %	2 %
$R_{FG} \pm 60^\circ$	91,98 %	63,32 %	22 %	4 %
$R_{GH} \pm 60^\circ$	90 %	63,33 %	28 %	8,67 %
Media	87,3 %	63,1 %	25,5 %	4,8 %

<sup>218</sup> Fuente: <http://closs.coas.oregonstate.edu/cogow/>

## 8.2.- Abril

El siguiente periodo en el que hemos tomado observaciones ha sido desde el día 1 al 15 de Abril desde el año 2000 hasta el 2009. En el siguiente mapa podemos observar que las velocidades de los vientos en la zona central del Atlántico Norte rondan sobre los 12 nudos, y que en la zona que la rodea ya se alcanzan los 14 nudos y que a partir de latitudes superiores a los 32° N predominan los 20 nudos de intensidad de viento.

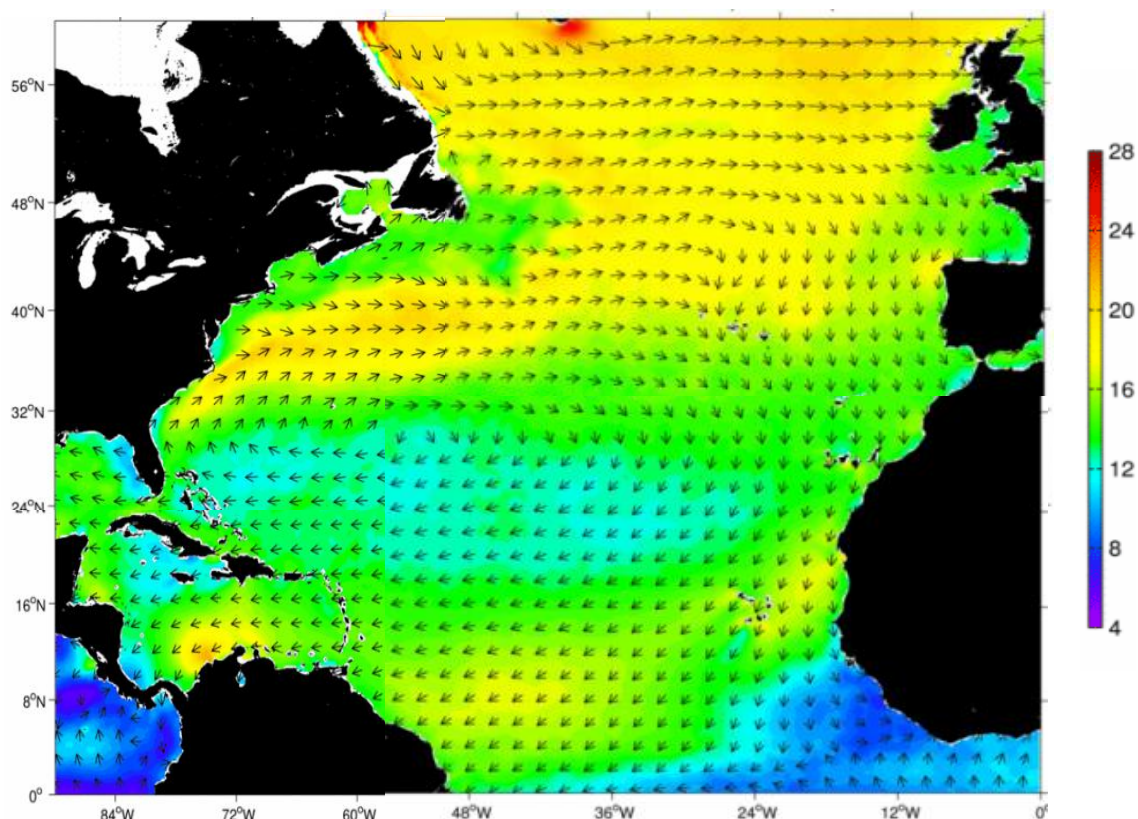
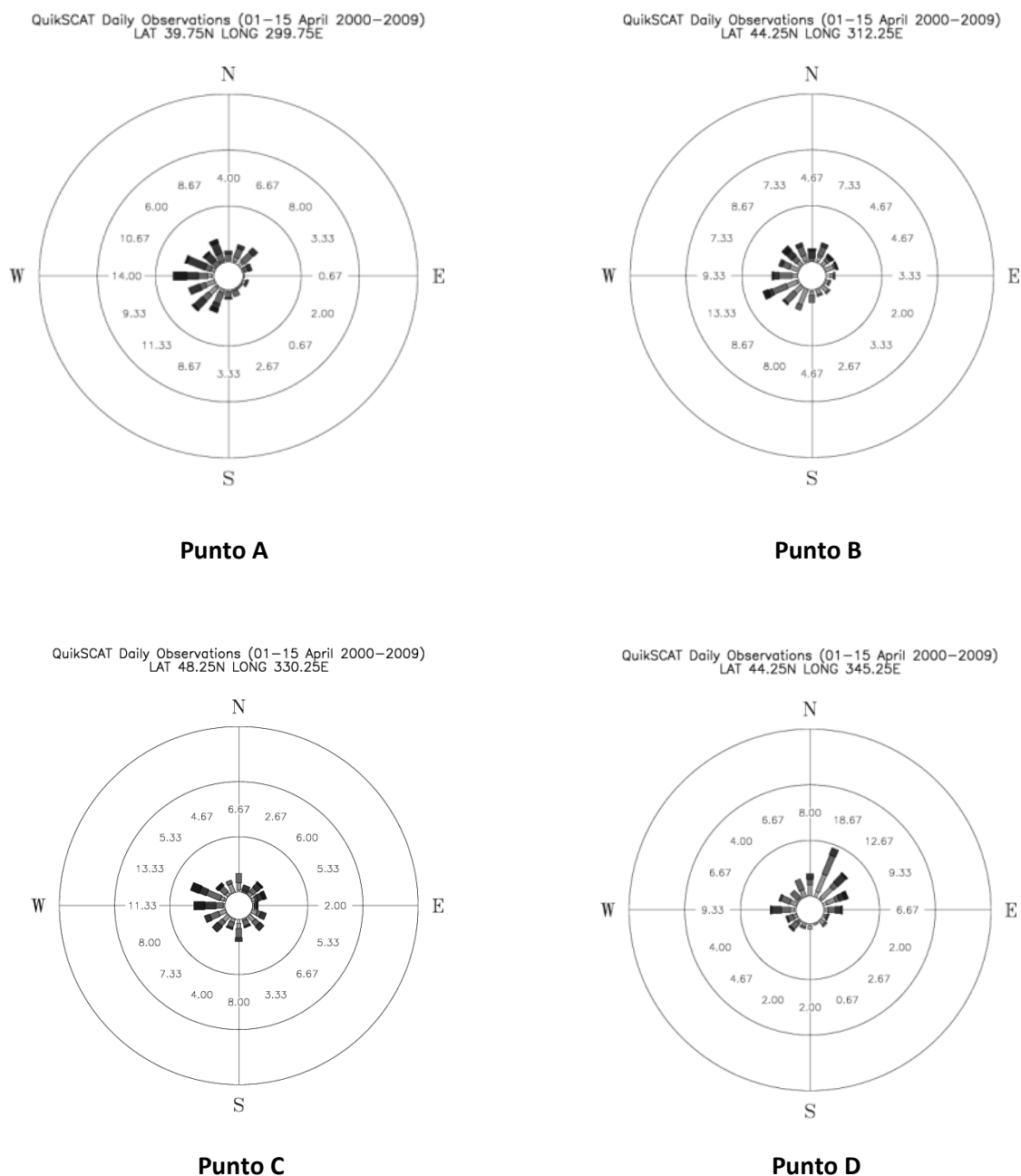


Figura 106: Mapa de dirección e intensidad del viento del 1 al 15 de Abril.<sup>219</sup>

<sup>219</sup> Fuente: <http://closs.coas.oregonstate.edu/cogow/>

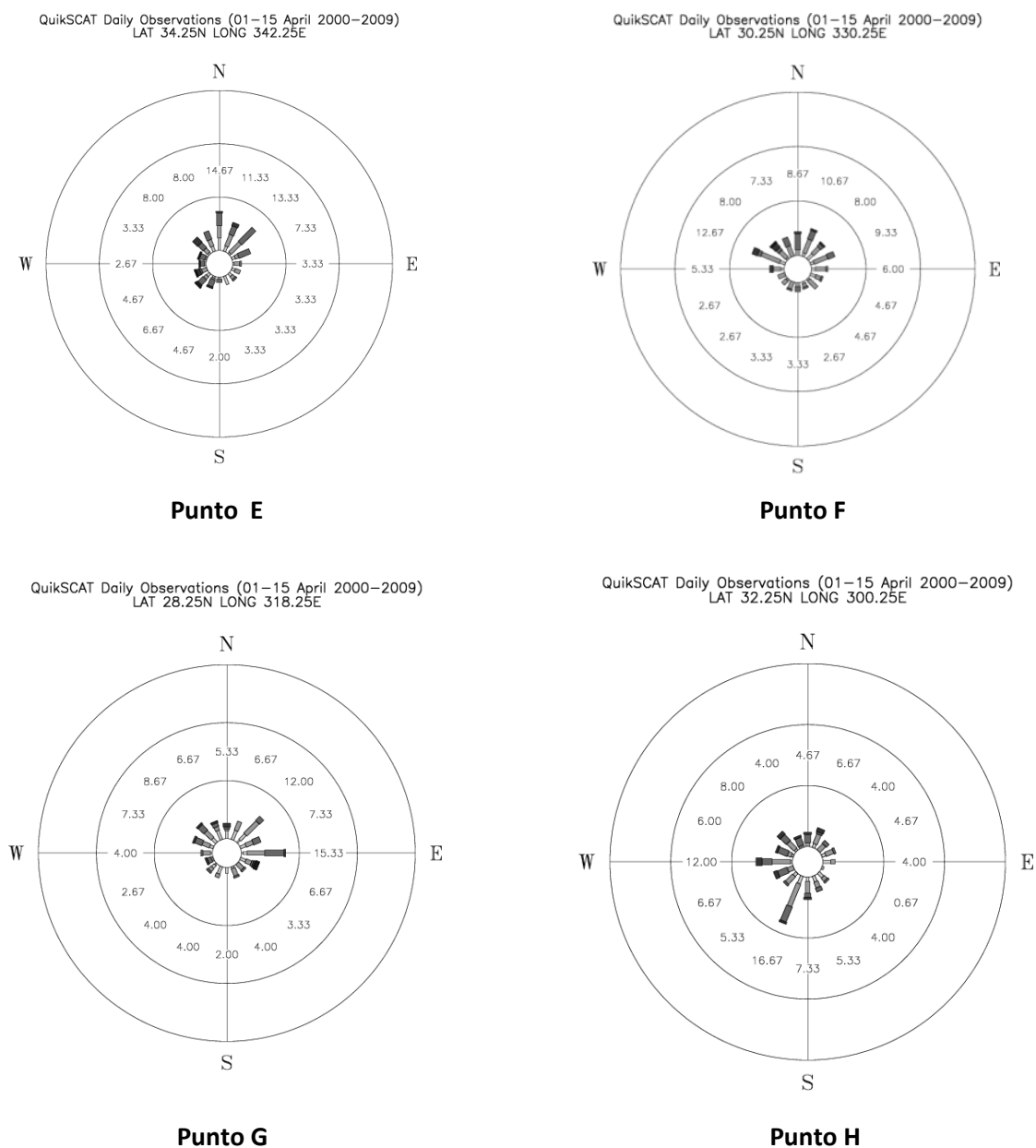


**Figura 107: Rosas porcentuales de los vientos de la ruta 1 en Abril**<sup>220</sup>

<b>Tabla 18: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 1 en Abril.</b>				
	Total Favorables	Vel $\geq 10$ m/s	Vel $\geq 15$ m/s	Vel $\geq 20$ m/s
$R_{AB} \pm 60^\circ$	74,65 %	73,32 %	57,98 %	36,65 %
$R_{BC} \pm 60^\circ$	73,33 %	71,33 %	42,6 %	14 %
$R_{CD} \pm 60^\circ$	71,33%	68,66 %	50,66 %	24 %
Media	73,1 %	71,1 %	50,41%	24,8 %

<sup>220</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>



**Figura 108: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 2 en Abril.**<sup>221</sup>

<b>Tabla 19: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 2 en Abril.</b>				
	Total Favorables	Vel $\geq 10 \text{ m/s}$	Vel $\geq 15 \text{ m/s}$	Vel $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{EF} \pm 60^\circ$	77,93 %	59,3 %	33,3 %	4,66 %
$R_{FG} \pm 60^\circ$	73,34 %	62,6 %	26,6 %	4,6 %
$R_{GH} \pm 60^\circ$	70,6 %	47,3 %	18,6 %	3,98 %
Media	73,95 %	56,4 %	26,2 %	4,1 %

<sup>221</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

### 8.3.- Julio

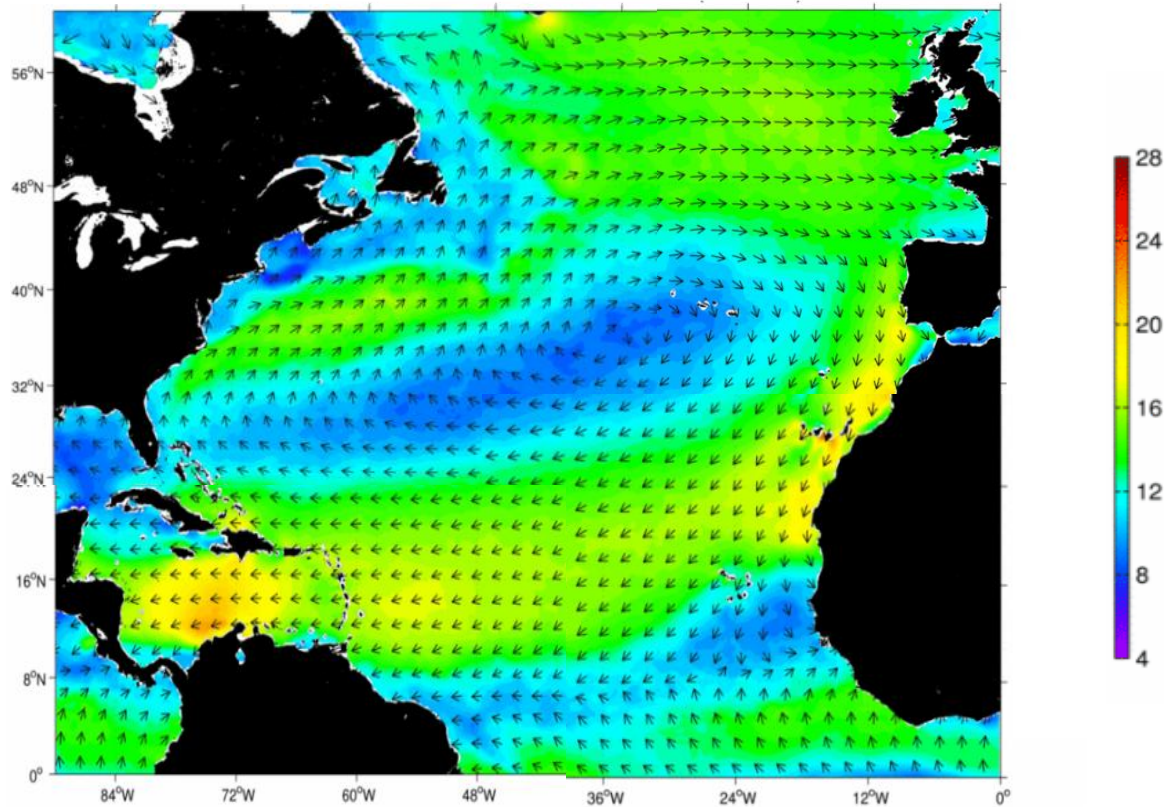
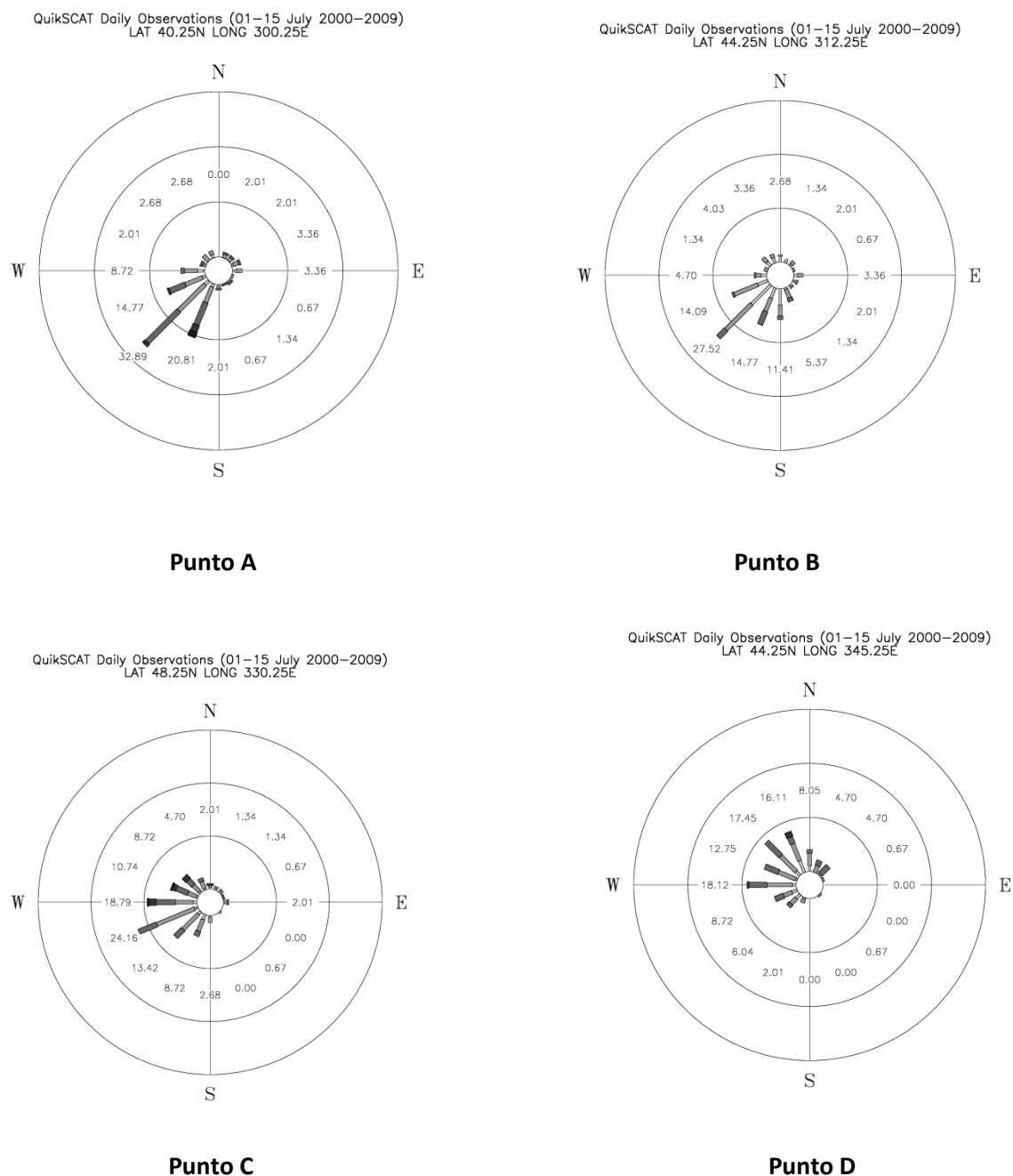


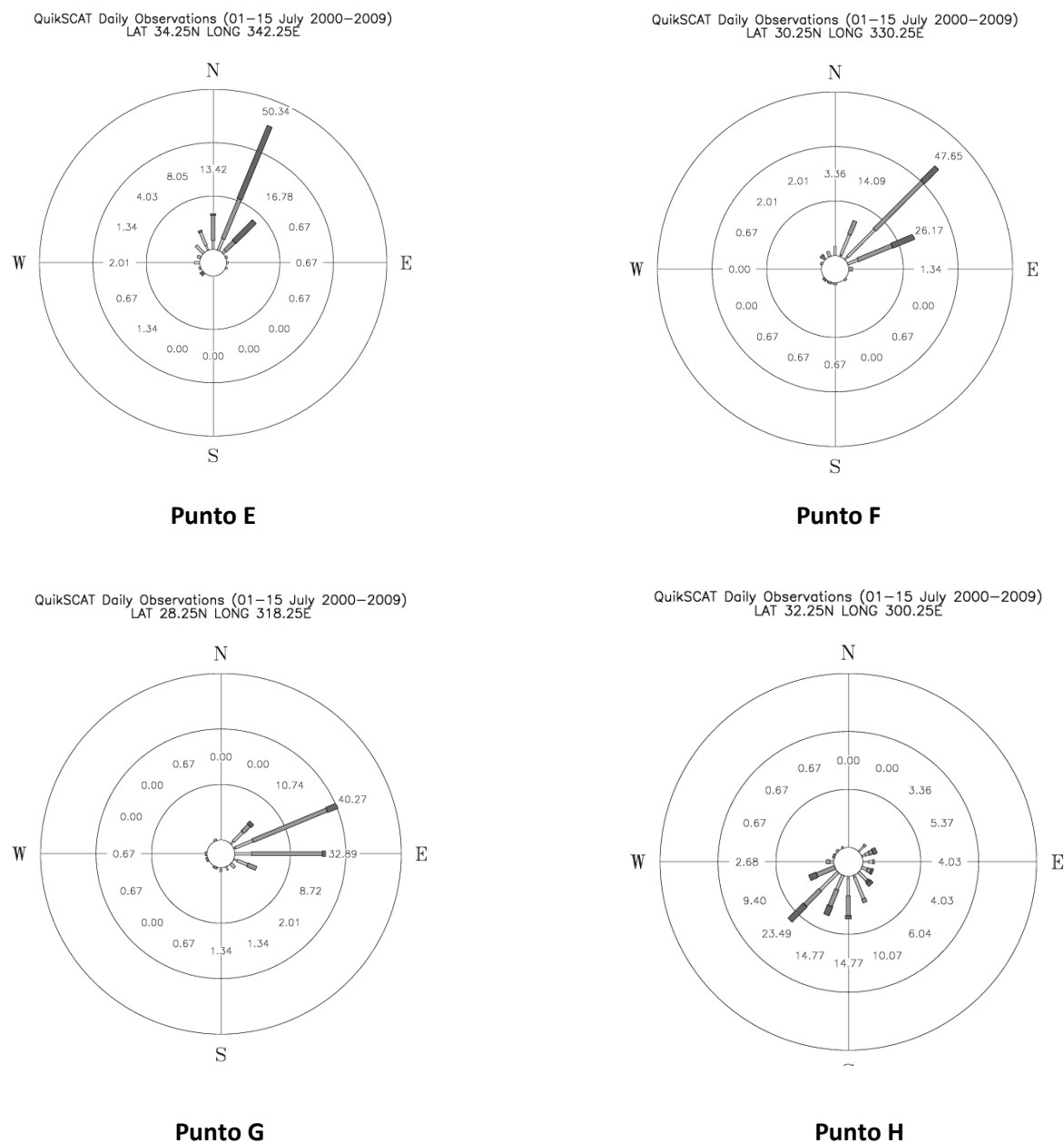
Figura 109: Mapa de dirección e intensidad del viento del 1 al 15 de Julio.<sup>222</sup>

<sup>222</sup> Fuente: <http://closs.coas.oregonstate.edu/cogow/>

**Figura 110: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 1 en Julio.**<sup>223</sup>**Tabla 20: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 1 en Julio.**

	Total Favorables	Vel $\geq 10 \text{ m/s}$	Vel $\geq 15 \text{ m/s}$	Vel $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{AB} \pm 60^\circ$	88,61 %	78,54 %	41,6 %	6,71 %
$R_{BC} \pm 60^\circ$	87,93 %	56,98 %	13,42 %	0 %
$R_{CD} \pm 60^\circ$	95,38 %	85,31 %	37,62 %	8,05 %
Media	90,64 %	73,61 %	30,88 %	4,92 %

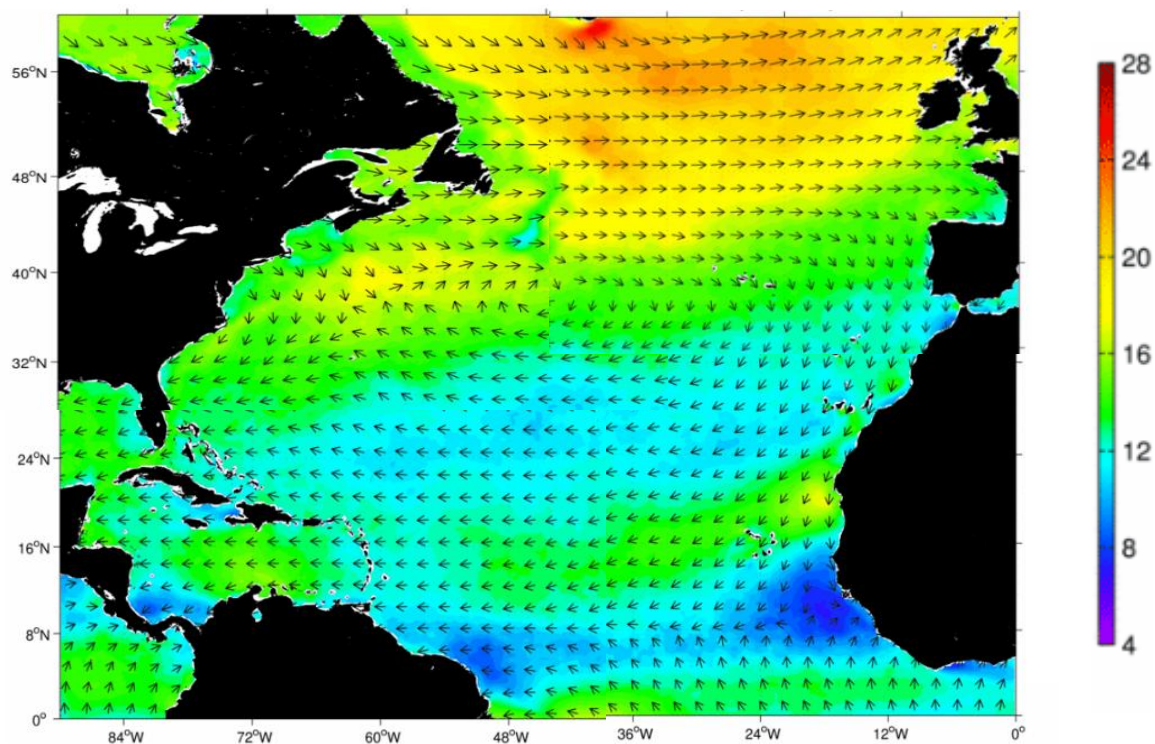
<sup>223</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

**Figura 111: Rosas porcentuales de los vientos en los puntos de la ruta 2 en Julio.**<sup>224</sup>**Tabla 21: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 2 en Julio.**

	Total Favorables	Vel $\geq 10$ m/s	Vel $\geq 15$ m/s	Vel $\geq 20$ m/s
$R_{EF} \pm 60^\circ$	94,63 %	71,81 %	40,94 %	0 %
$R_{FG} \pm 60^\circ$	97,97 %	62,4 %	16,1 %	0 %
$R_{GH} \pm 60^\circ$	97,99 %	68,46 %	6,71 %	0 %
Media	96,8 %	67,6 %	21,25 %	0 %

<sup>224</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

#### 8.4.- Octubre

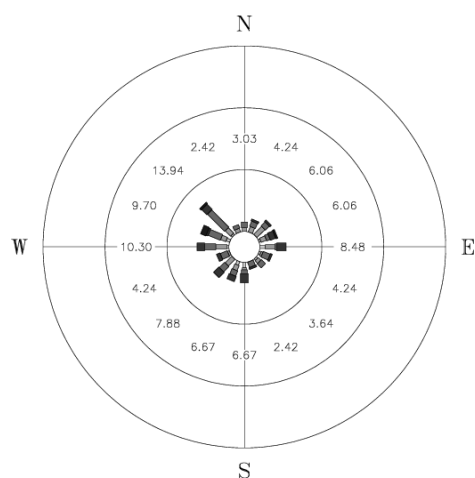


**Figura 112: Mapa de dirección e intensidad del viento del 1 al 15 de Octubre.**<sup>225</sup>

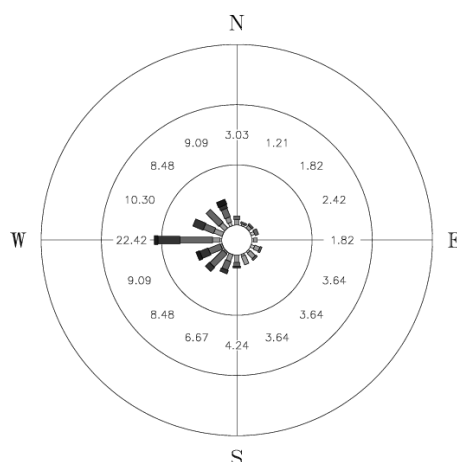
<sup>225</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

**Figura 113: Rosas porcentuales de los vientos en los puntos de la ruta 1 en Octubre.**<sup>226</sup>

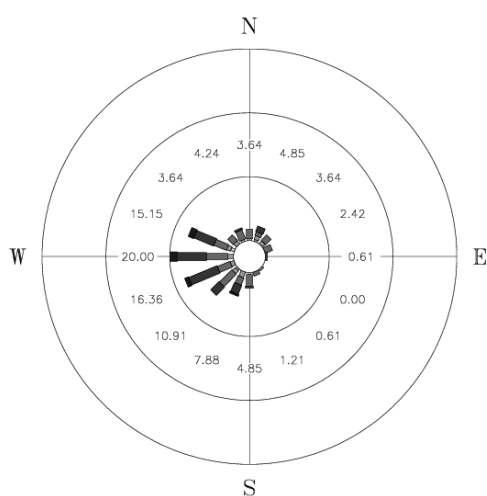
QuikSCAT Daily Observations (01–15 October 1999–2009)  
LAT 40.25N LONG 299.75E

**Punto A**

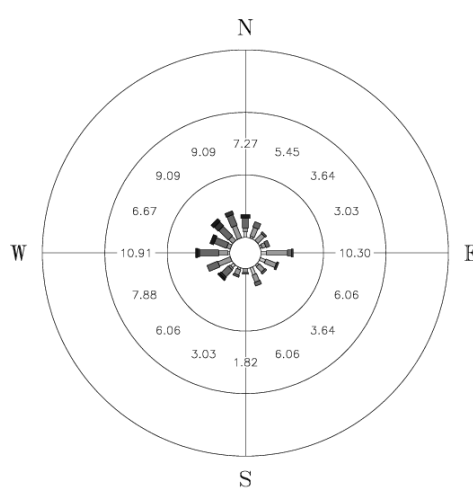
QuikSCAT Daily Observations (01–15 October 1999–2009)  
LAT 44.25N LONG 312.25E

**Punto B**

QuikSCAT Daily Observations (01–15 October 1999–2009)  
LAT 48.25N LONG 330.25E

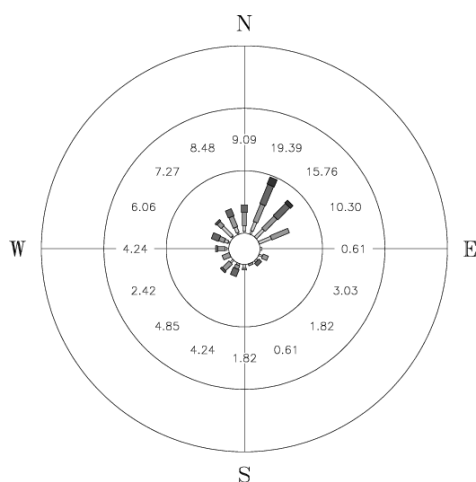
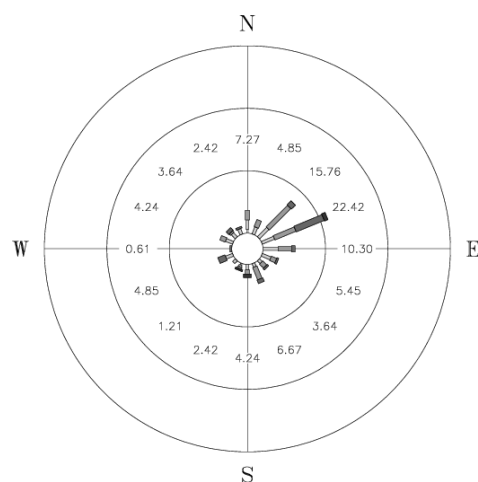
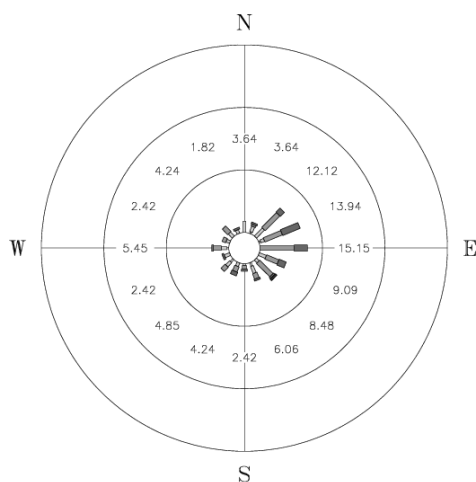
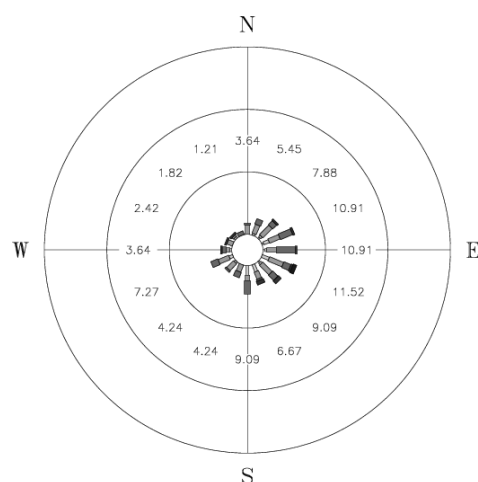
**Punto C**

QuikSCAT Daily Observations (01–15 October 1999–2009)  
LAT 44.25N LONG 345.25E

**Punto D****Tabla 22: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 1 en Octubre.**

	Total Favorables	Vel $\geq 10 \text{ m/s}$	Vel $\geq 15 \text{ m/s}$	Vel $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{AB} \pm 60^\circ$	70,83 %	64,78 %	48,43 %	16,95 %
$R_{BC} \pm 60^\circ$	86,06 %	83 %	61,82 %	23 %
$R_{CD} \pm 60^\circ$	91,52 %	87,88 %	77,58 %	41,21 %
Media	82,8 %	78,5 %	62,61 %	27 %

<sup>226</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

**Figura 114: Rosas porcentuales de los vientos en la ruta 2 en Octubre.**<sup>227</sup>QuikSCAT Daily Observations (01–15 October 1999–2009)  
LAT 34.25N LONG 342.25E**Punto E**QuikSCAT Daily Observations (01–15 October 1999–2009)  
LAT 30.25N LONG 330.75E**Punto F**QuikSCAT Daily Observations (01–15 October 1999–2009)  
LAT 28.25N LONG 318.25E**Punto G**QuikSCAT Daily Observations (01–15 October 1999–2009)  
LAT 32.25N LONG 300.25E**Punto H****Tabla 23: Porcentaje de vientos favorables según sus velocidades de ruta 2 en Octubre.**

	Total Favorables	Vel $\geq 10 \text{ m/s}$	Vel $\geq 15 \text{ m/s}$	Vel $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{EF} \pm 60^\circ$	78,21 %	52,74 %	22,43 %	3,64 %
$R_{FG} \pm 60^\circ$	86,06 %	55,75 %	19,39 %	2,42 %
$R_{GH} \pm 60^\circ$	83,63 %	60 %	18,78 %	0,61 %
Media	82,81 %	56,2 %	20,2 %	2,22 %

<sup>227</sup> Fuente: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>



Se ha calculado el porcentaje promedio de los vientos favorables durante estos periodos, de modo que en función de la velocidad del viento en superficie podrá determinarse aproximadamente las zonas y las épocas del año en las que es más probable utilizar un sistema de propulsión eólico.

En primer lugar, se ha realizado una tabla en la que se representa la probabilidad de ocurrencia de vientos favorables de más de  $10 \text{ m/s}$  para cada rumbo y en las cuatro quincenas analizadas. A continuación se ha realizado la misma tabla tanto para vientos con velocidades superiores a  $15 \text{ m/s}$  como para  $20 \text{ m/s}$ .

<b>Tabla 24: Porcentaje de los vientos que superan los <math>10 \text{ m/s}</math> de velocidad .</b>					
<b>Ruta 1</b>	<b>1-15 Enero</b>	<b>1-15 Abril</b>	<b>1-15 Julio</b>	<b>1-15 Octubre</b>	<b>Media R1</b>
$R_{AB} \pm 60^\circ$	96 %	73,32 %	78,54 %	64,78 %	78,16 %
$R_{BC} \pm 60^\circ$	97,2 %	71,33 %	56,98 %	83 %	77,12 %
$R_{CD} \pm 60^\circ$	94 %	68,66 %	85,31 %	87,88 %	83,96 %
<b>Media 1</b>	95,7 %	71,1 %	73,61 %	78,55 %	79,74 %
<b>Ruta 2</b>	<b>1-15 Enero</b>	<b>1-15 Abril</b>	<b>1-15 Julio</b>	<b>1-15 Octubre</b>	<b>Media R2</b>
$R_{EF} \pm 60^\circ$	62,67 %	59,3 %	71,81 %	52,74 %	61,63 %
$R_{FG} \pm 60^\circ$	63,32 %	62,6 %	62,4 %	55,75 %	61 %
$R_{GH} \pm 60^\circ$	63,33 %	47,3 %	68,46 %	60 %	59,77 %
<b>Media 2</b>	63,1 %	56,4 %	67,55 %	56,16 %	60,80 %
<b>Media Total</b>	78,58 %	63,75 %	70,58 %	67,35 %	70,27 %

Como puede observarse en la tabla anterior, a rasgos generales y cuando se trata de vientos favorables, existe una probabilidad media de ocurrencia del 80 % cuando se trata de la ruta 1, mientras que en la ruta 2 se encuentra sobre el 60 %.

Con estas tablas, se puede visualizar cual es el periodo y el tramo en el que hay más probabilidad de encontrarse viento durante la ruta simulada. De modo que podría decirse que la variación media entre la probabilidad ocurrencia de vientos superiores a los  $10 \text{ m/s}$  en invierno (Enero) y en verano (Julio) ronda el 20 % en la ruta 1, siendo la mayor en invierno. En cambio, la variación en la ruta 2 ronda el 5 % siendo mayor en verano.

Cuando se trata de vientos superiores a  $15 \text{ m/s}$ , empieza a decrecer la probabilidad de ocurrencia, aunque en determinadas zonas y épocas se sigue observando una clara aparición de los mismos.

<b>Tabla 25: Porcentaje de los vientos que superan los <math>15 \text{ m/s}</math> de velocidad.</b>					
<b>Ruta 1</b>	<b>1-15 Enero</b>	<b>1-15 Abril</b>	<b>1-15 Julio</b>	<b>1-15 Octubre</b>	<b>Media R3</b>
$R_{AB} \pm 60^\circ$	90 %	57,98 %	41,6 %	48,43 %	59,5 %
$R_{BC} \pm 60^\circ$	93,9 %	42,6 %	13,42 %	61,82 %	52,93 %
$R_{CD} \pm 60^\circ$	91,3 %	50,66 %	37,62 %	77,58 %	64,29 %
<b>Media 3</b>	91,73 %	50,41 %	30,88 %	62,61 %	58,9 %
<b>Ruta 2</b>	<b>1-15 Enero</b>	<b>1-15 Abril</b>	<b>1-15 Julio</b>	<b>1-15 Octubre</b>	<b>Media R4</b>
$R_{EF} \pm 60^\circ$	26,67 %	33,3 %	40,94 %	22,43 %	30,83 %
$R_{FG} \pm 60^\circ$	22 %	26,6 %	16,1 %	19,39 %	21 %
$R_{GH} \pm 60^\circ$	28 %	18,6 %	6,71 %	18,78 %	18 %
<b>Media 4</b>	25,55 %	26,16 %	21,25 %	20,2 %	23,29 %
<b>Media Total</b>	58,64 %	38,28 %	26,06 %	41,40 %	41 %

En cambio, en la ruta 1, cuando se trata de vientos superiores a  $15 \text{ m/s}$  la variación de la probabilidad con respecto a los  $10 \text{ m/s}$  en enero, es mínima, pero en verano se desploma, lo que nos muestra una clara tendencia de vientos fuertes en invierno y flojos en verano, ya que en julio, la probabilidad de hallar vientos superiores a  $15 \text{ m/s}$ , únicamente es del 30%, mientras que en enero sigue siendo del 91,73 %.

Pero en la ruta 2, los vientos con velocidades superiores a  $15 \text{ m/s}$ , y en el mejor de los casos, no suceden más que un 26,16 % de media en abril, por lo que se puede deducir que esta ruta tiene pocas probabilidades de aportar vientos de más de  $15 \text{ m/s}$ . La ruta 1 tiene una probabilidad media de encontrarse vientos superiores a  $15 \text{ m/s}$  del 58,9 %, mientras que la ruta 2 es del 23,29 %.

Tal como se explica en el apartado 5.1.3, el viento verdadero varía en función de la velocidad del buque, de forma que desde bordo se observa en un viento aparente con un rumbo y velocidad diferentes a los originales.

Por se deduce que la propulsión a viento en esta ruta puede realizarse, pero con velocidades no superiores a los 10 nudos, ya que cuanto mayor sea la velocidad del buque, menor será la velocidad del viento relativo proveniente del sector favorable, teniendo en cuenta que el sector favorable se encuentra en la zona de popa.

<b>Tabla 26: Equivalencias escala Beauford</b>		
Escala Beauford	Metros / Segundo	Nudos
2	1,6 – 3,4	3 – 6
3	3,4 – 5,4	7 – 10
4	5,5 – 7,9	11 – 15
5	8 – 10,7	16 – 20
6	10,8 – 13,8	21 – 26

## 9.- La Navegación Meteorológica.

Hoy en día, la tecnología de navegación incluye redes de información marítima y de previsión meteorológica, de modo que estos buques pueden navegar de forma segura y eficiente. Con estos sistemas se pueden diseñar rutas optimizadas, a partir de las previsiones meteorológicas que se van actualizando, con el fin de proporcionar por ejemplo, la mayor propulsión posible a partir de la fuerza del viento.

Por ejemplo, en Europa existe el DMI Maritime Service<sup>228</sup>, que es una sección comercial del Instituto Meteorológico del Ministerio de Clima y Energía Danés. Fue fundado en 1971 como sistema de rutas meteorológicas mundial, DMI es uno de los mayores centros en Europa que provee rutas meteorológicas globales. Su interés radica en asegurar la ruta más segura y económica en cooperación y diálogo con los Capitanes y los Armadores.

Su programa SeaPlanner<sup>229</sup> con FuelSaver es una herramienta para planear estas rutas a bordo, desarrollado por Force Technology en cooperación con DMI Maritime Service. Además del pronóstico meteorológico, también se proporciona información regional referente a tormentas tropicales e icebergs, asistiendo así a los Capitanes para planear rutas seguras a través de los océanos con plena atención en la economía de combustible y limitando las emisiones de  $CO_2$ .

El corazón de este programa es un modelo de propulsión desarrollado por Force Technology. Este modelo está diseñado para tomar en cuenta toda la información disponible sobre el buque, de modo que puede obtener resultados fiables y acordes al tipo de buque. Si se dispone de información más detallada del mismo, como resultados de pruebas a escala o reales, los resultados obtenidos serán más precisos.

La planificación de la ruta con este sistema puede hacerse en diferentes modos: Mínimo tiempo en ruta, ETA fijada con potencia constante, ETA fijada con velocidad optimizada y ETA fija con constantes RPM.

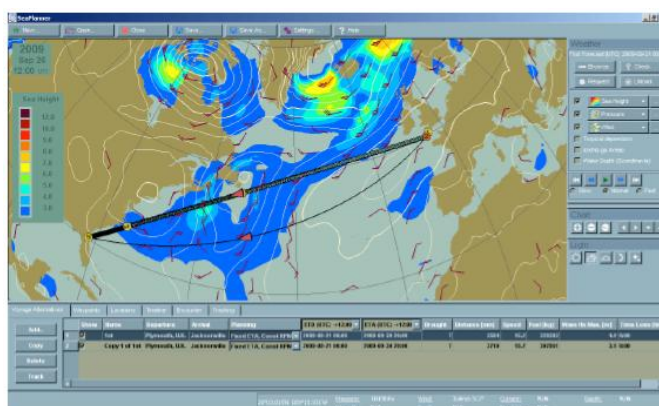


Figura 115: Programa de ruta meteorológica SeaPlanner.<sup>230</sup>

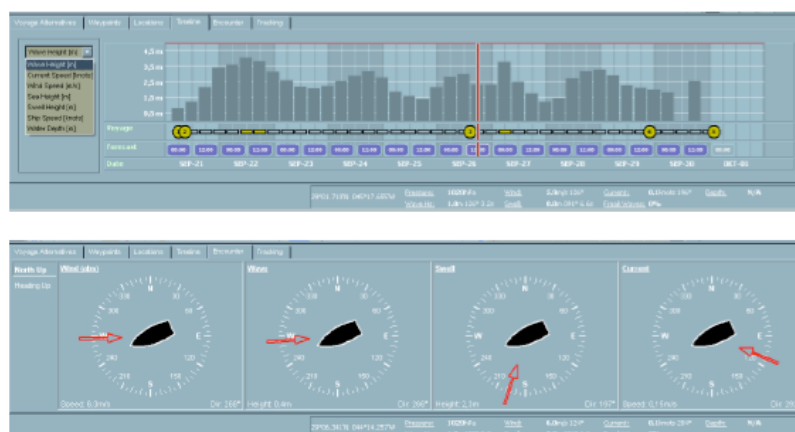
<sup>228</sup> <http://www.weatherrouting.dk/routeing/>

<sup>229</sup> [http://weatherrouting.dk/fileadmin/PDF\\_Filer/SeaPlanner.pdf](http://weatherrouting.dk/fileadmin/PDF_Filer/SeaPlanner.pdf)

<sup>230</sup> [http://weatherrouting.dk/fileadmin/PDF\\_Filer/SeaPlanner.pdf](http://weatherrouting.dk/fileadmin/PDF_Filer/SeaPlanner.pdf)

La gráfica resultante proporcionada por el programa SeaPlaner con FuelSaver facilita la navegación entre las diferentes funcionalidades del mismo y para ajustar el mapa a la zona de interés.

Las condiciones meteorológicas a lo largo de varias rutas planeadas pueden ser visualizadas en el mapa o se puede encontrar una vista más detallada en la línea de tiempo.



**Figura 116: Histograma de la ruta meteorológica.**<sup>231</sup>

En un buque convencional, este programa puede reducir los consumos en menos de un 6% de media. Aunque un 6% parece poco si se aplicase a todos los buques convencionales ya supondría una reducción considerable.

Lo interesante de esta herramienta, es que al estar compuesta por el modelo del buque, puede predecir, para cada buque en concreto, cuál sería la ruta más conveniente en función de las condiciones meteorológicas.

De modo que supone una gran ventaja para el comercio mundial para empezar a utilizar medios eólicos de propulsión auxiliar.

Proporcionando así una ayuda muy significativa a la hora de predecir el camino a seguir, con el fin de realizar los viajes de una forma más segura y eficiente.

<sup>231</sup> Fuente: [http://weatherrouting.dk/fileadmin/PDF\\_Filer/SeaPlanner.pdf](http://weatherrouting.dk/fileadmin/PDF_Filer/SeaPlanner.pdf)

## 10.- Conclusiones

Los diversos sistemas de propulsión a viento, han sido probados en maquetas a escala, algunas veces en escala real, y otras en miniatura en un túnel del viento, de modo que con toda esta información se han ido mejorando los rendimientos de los mismos.

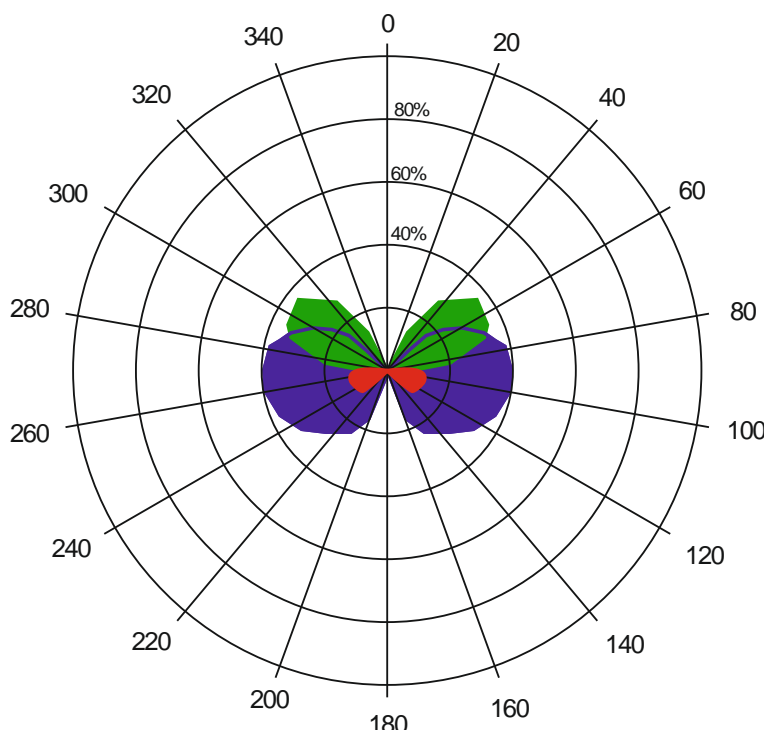
Cuando se han probado en buques reales, se han obtenido los ahorros proporcionales de combustible, pero como cada sistema se ha analizado en buques distintos, no se puede cuantificar claramente la diferencia entre el ahorro que nos proporcionarían los diversos sistemas en un buque en concreto, bajo las mismas condiciones de viento.

Entonces, para hacer una valoración de los diferentes medios de propulsión explicados anteriormente, se han representado los ahorros previstos sobre tres diagramas polares para distintas velocidades del viento, con el propósito de diferenciar las posibilidades de los diversos sistemas instalados en diferentes buques.

La superficie en rojo, representa el ahorro que podría obtenerse a partir de la aplicación de una cometa de  $500m^2$ , con una longitud del cabo de remolque de 350 metros, en un buque de 50.000 Tm navegando a 15 nudos y con una máquina propulsora de 12.000kW, tal como se explica en la figura 83 del apartado 6.3.7 de este trabajo.

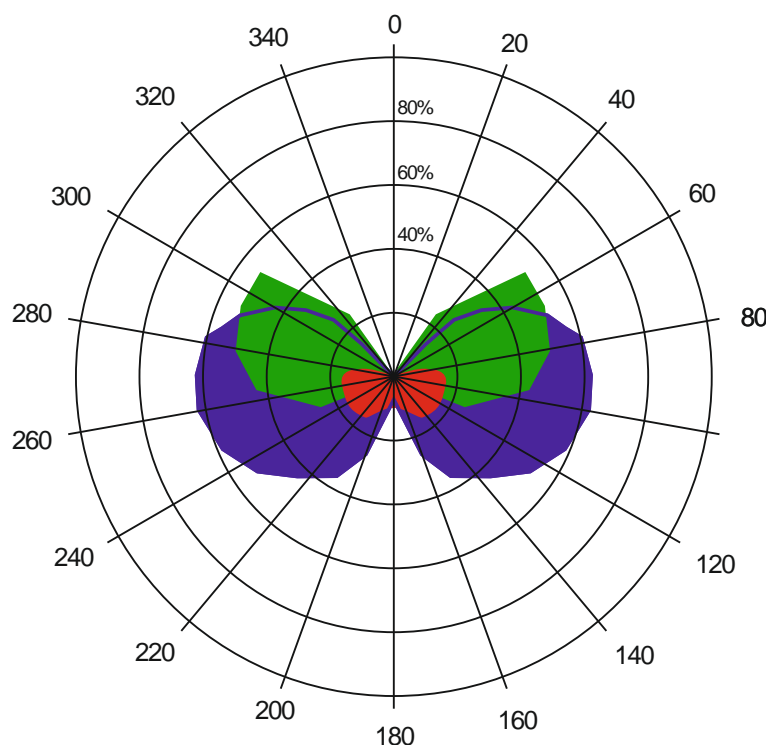
La superficie en verde, representa los ahorros de combustible que se obtendrían con un buque de 76.878Tm que tiene instalados 4 rotores Thiiink, y navega a 14,5 nudos, tal como viene explicado en el apartado 6.24 de este trabajo, en la figura 68 sobre *el empuje y rendimiento de 4 rotores Flettner*.

Por último, la superficie en violeta, representa los ahorros que supondría la instalación de una cascada de velas rígidas con una superficie total de  $9000 m^2$ , y a bordo de un granelero tipo cape-size de 180.000Tm que navega a 14 nudos, tal como se representa en la figura 47.



**Figura 117: Comparativa de ahorros en vientos de fuerza 4 Beauford. ( $5.5 - 7.9 m/s$ ).<sup>232</sup>**

<sup>232</sup> Fuente propia.

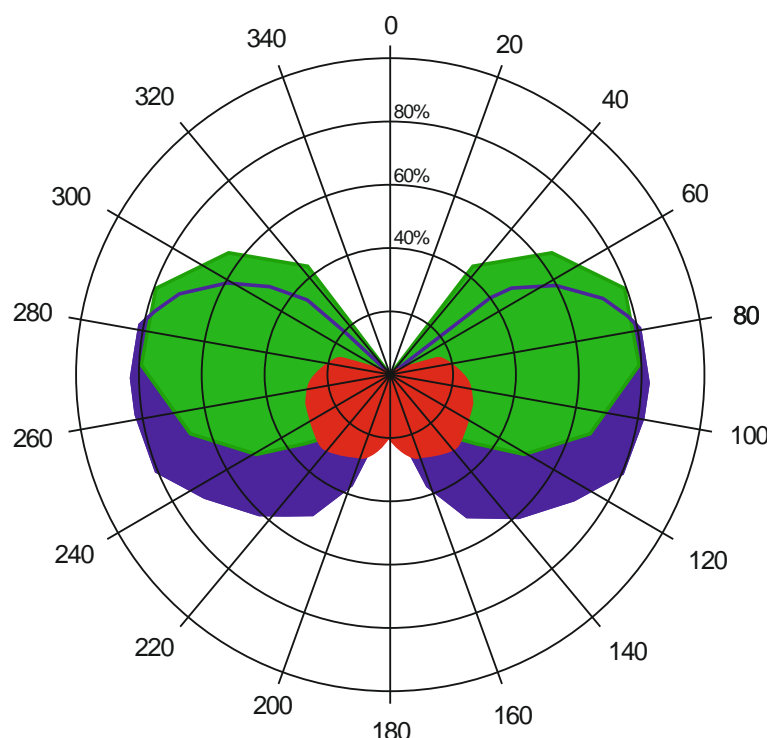


**Figura 118: Comparativa de ahorros en vientos de fuerza 5 Beauford. (8 – 10.7  $m/s$ ).<sup>233</sup>**

<b>Tabla 27: Resumen de los vientos que superan los 10 <math>m/s</math> de velocidad .</b>					
<b>Ruta 1</b>	<b>1-15 Enero</b>	<b>1-15 Abril</b>	<b>1-15 Julio</b>	<b>1-15 Octubre</b>	<b>Media R</b>
<b>Media 1</b>	95,7 %	71,1 %	73,61 %	78,55 %	79,74 %
<b>Media 2</b>	63,1 %	56,4 %	67,55 %	56,16 %	60,80 %
<b>Media Total</b>	78,58 %	63,75 %	70,58 %	67,35 %	70,27 %

Si se compara la información referente a los vientos en la ruta por el Atlántico Norte, podría concluirse que hay una gran probabilidad de obtener ahorros de hasta un 60 % del combustible, ya que más del 70% del tiempo, el viento sopla a velocidades superiores que 10  $m/s$  desde un sector favorable.

<sup>233</sup> Fuente Propia.



**Figura 119: Comparativa de ahorros en vientos de fuerza 6 Beauford. ( $10.8 - 13.8 \text{ m/s}$ ).<sup>234</sup>**

<b>Tabla 28: Porcentaje de los vientos que superan los <math>15 \text{ m/s}</math> de velocidad.</b>					
<b>Ruta 1</b>	<b>1-15 Enero</b>	<b>1-15 Abril</b>	<b>1-15 Julio</b>	<b>1-15 Octubre</b>	<b>Media R3</b>
<b>Media 3</b>	91,73 %	50,41 %	30,88 %	62,61 %	58,9 %
<b>Media 4</b>	25,55 %	26,16 %	21,25 %	20,2 %	23,29 %
<b>Media Total</b>	58,64 %	38,28 %	26,06 %	41,40 %	41 %

Se puede hacer la misma comparación con los vientos que superan los  $15 \text{ m/s}$  en la ruta por el Atlántico Norte, de modo que se concluiría que de media, estos vientos sucederán hasta un 40 % del tiempo, proporcionando hasta un 80% del ahorro de combustible.

Con estos diagramas polares se puede distinguir claramente las características de cada tipo de sistema de propulsión, de modo que se puede visualizar que tanto las velas rígidas como los rotores flettner proporcionan una propulsión adicional cuando se trata de vientos que provienen del través, siendo ineficaces cuando provienen de ángulos inferiores a 20 grados de la línea de crujía del buque.

En cambio, las cometas proporcionan un mayor empuje longitudinal cuando los vientos provienen de la popa del buque, de modo que se van volviendo ineficaces a medida que el viento va rolando hacia la proa.

<sup>234</sup> Fuente Propia.



Por tanto se puede decir que la mayoría de sistemas proporcionan una propulsión auxiliar cuando se trata de vientos del través, o de la popa, en el caso de las cometas. Pero curiosamente no hay muchos sistemas que proporcionen un ahorro de combustible cuando se trata de vientos por la proa.

El único sistema que proporciona un potencial ahorro de combustible cuando el viento proviene de la proa, son los aerogeneradores de eje horizontal. Aunque este sistema no proporciona un empuje resultante, puede aportar una considerable cantidad de energía eléctrica, que puede ser aplicada para los propulsores principales, si son eléctricos también.

Por tanto, una vez distinguidos los diversos sistemas de propulsión a viento, y analizado sus características propias, en función de la dirección e intensidad del viento, se podría decir que la propulsión única y exclusiva de un buque mediante estos sistemas, no es viable para mantener una velocidad constante, pero que si se trata de un buque propulsado mecánicamente o eléctricamente, pueden aportar significantes ahorros de combustible.

Una vez valorados los ahorros que proporcionarían estos sistemas, debería realizarse un análisis de los vientos predominantes en la ruta, con el fin de decidir qué sistema proporcionaría un mayor ahorro de combustible, y por tanto una amortización más rápida.

Actualmente, con el precio actual del petróleo, los sistemas se amortizarían en un periodo de 5 a 10 años, dependiendo de la ruta que se realiza. Entonces hay que destacar que si los precios del combustible descendieran, se alargaría el periodo de amortización, y si los precios aumentasen, se acortaría el periodo de amortización, de forma que se tardaría menos tiempo en pagar el sistema instalado.

Por tanto, es muy importante distinguir la vida útil de cada sistema, considerando su fragilidad y las averías que podría llegar a tener, durante la operativa de un buque en navegación, de modo que sería recomendable elegir el sistema más resistente posible, de modo que se garantice su uso durante todo el periodo de amortización, y si pudiera ser, toda la vida útil de los buques.

Si se continúa estudiando y trabajando sobre estos medios de propulsión, podría ir aumentándose la eficiencia de los buques a lo largo de su vida útil. Además, si se estudiase la aplicación de diversos sistemas combinados, podría incrementarse mucho más esta eficiencia, a partir de la reducción de las resistencias hidrodinámica y aerodinámica de los buques.

## 11. Bibliografía.

Second IMO GHG Study 2009 Update of the 2000 GHG. Buhaug, Ø., et al.,

Resolución A.963(23) IMO *Polices and practices relate to the reduction of greenhouse gas emissions from ships*. 4 March 2004.

Zabi Bazari, Lloyd Register, UK. Tore Longva, DNV, Oslo. *'Assessment of IMO mandated energy efficiency measures for international shipping'*. 31 Oct 2011.

Lloyd Bergeson, Kent Greenwald. *"Sail assist developments"* 1979–1985. Wind Ship Company.

Patricia Izaguirre, Luis Pérez, Francisco Pérez, Alberto Torres. *"Viability study of sailing propulsion combined with a conventional system"* Universidad Politécnica de Madrid. Canal de Ensayos ETSIN. Julio 2011.

Eiffel, Gustave *"The Resistance of The Air and Aviation."* (1913). London: Constable & Co Ltd.

Marchaj, C. A. *"Sail performance: techniques to maximise sail power"* (2003). (Rev. ed. ed.). London: Adlard Coles Nautical. pp. 147 figure 127 lift vs drag polar curves.

Martin Rosander og Jens O.V. Bloch, Pelmatic Knud E. Hansen. *"Modern Windships"* Copenhagen, December 1999.

Toshifumi Fujiwara, Koichi Hirata, Michio Ueno and Tadashi Nimura et al. *"On Aerodynamic Characteristics of a Hybrid-Sail with Square Soft Sail."* National Maritime Research Institute, Tokyo, Japan. May 2003.

Aaron Burden, Thomas Lloyd, Simon Mockler, Lorenzo Mortola, le Bum Shin, Ben Smith. *"Concept Design of a Fast Sail Assisted Feeder Container Ship"* University of Southampton. 2009/2010.

Kazuyuki Oushi, Kiyoshi Uzawa and Akihiro Kanai. *"Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel"*. University of Tokyo, Japan. June 2011.

Ingham, P. and Tersløv O. *"Wind tunnel tests and manoeuvre simulator tests with different types of sails and ships"* (Julio 1985). Japan Institute of Navigation.

Isaku AMEMIYA & Isamu OHSUGI. *"The Experiments on the Sailing Performance of the Sail Training Ship Nippon Maru"*. Japan Institute of Navigation. 1988.

Toshifumi Fujiwara, Grant E. Hearn, Fumitoshi Kitamura, Michio Ueno. *"Sail-sail and sail-hull interaction effects of hybrid-sail assisted bulk carrier"* Journal of Marine Science and Technology June 2005, Volume 10, Issue 2, pp 82-95.

Vincent G. Chapin, Romaric Neyhousser, Guillaume Dulliand, Patrick Chassaing. "Analysis, Design and Optimization of Navier-Stokes Flows around Interacting Sails" MDY06 International Symposium on Yacht Design and Production. March 2006.

Kazuyuki Ouchi, Kiyoshi Uzawa. "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel." Graduate School of Engineering. The university of Tokyo. Japan. Second International Symposium on marine propulsors. Smp'11, Hamburg, Germany, June 2011.

Peter Schenzle. "Wind Propulsión for Solar Ship Operation". Hamburg. Germany. June 2006.

Yoshimasa Manami, Tadashi Nimura, Toshifumu Fujiwara, Mishio Ueno. "Investigation into Underwater Fin Arrangement Effect on Steady Sailing Characteristics of a Sail Assisted Ship". Maritime Safety Department, National Maritime Research Institute, Mitaka, Tokyo. 2003.

Guillaume FOURNIER, Stéphanie PELLERIN & Loc TA PHUOC. "Control of turbulent incompressible flows around bluff bodies using Large Eddy Simulations"

Prof. Dr.-Ing. HOLGER Watter. "MAGNUS-Effekt & FLETTNER-Rotor", Escuela Técnica Superior de Flensburg. Universidad de Ciencias Aplicadas. Jan 2011.

S H Salter, "A Flettner-Driven Catamaran", School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh. Feb 2007.

Schenzle, P. "Estimation of Wind Assistance Potential" (1985)

Jorn H. Baayen, "Automatic trajectory tracking control of kites", March 2011, Delft Institute of Applied Mathematics.

M. L. Loyd. "Crosswind kite power". Journal of Energy. 1980.

B. Houska y M. Diehl. "Optimal control of towing kites" In 44<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, pages 2693-2697, San Diego, CA, 2006.

L. Fagiano, M. Milanese, V. Razza y I. Gerlero. "Control of power kites for naval propulsion" In American Conference, Baltimor, MA, 2010.

Peter Naaijen & Vincent Koster, "Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite". Delf University of Technology.

Nicolae Grosan, Dumitru Dinu. "Considerations Regarding Kite Towed Ship's Manoeuvring", Navigation and Maritime Transport. Maritime Engineering. Constanta Maritime University. ROMANIA. Sept 2010.

Billy Roeseler, Theo Schmidt, Andrew Beattie, Cory Roeseler, Dave Culp, Russell Long, Tad McGeer, & Richard Wallace. "The Case for Transport Sail Craft". World Aviation Congress, Los Angeles, California, on October 24, 1996

Naaijen P.,Koster V.,Dallinga R.P. *"On the Power Savings by an Auxiliary Kite Propulsion System"*. ISP Volume 53 No.4 . 2006.

Isherwood, R.M., *"Wind Resistance of merchant Ships"*. Trans. Of the Royal Institution of Naval Architects, 1973.

Lorenzo Fagiano, Mario Mialese, Valentino Razza. *"Optimization and control of a hybrid kite boat"*. Dipartimento di Automatica e Informatica. Politecnico di Torino, Torino. Italy.

I.Argatov, P. Rautakorpi, y R. Silvennoinen. *"Estimation of the mechanical energy output of the kite wind generator"*. Renewable Energy. Sept 2008.

Lorenzo Fagiano. *"Control of Tethered Airfoils for High-Altitude Wind Energy Generation"*. Politecnico di Torino. 2009.

M.Canale, L.Fagiano, y M. Milanese. *"High altitude wind energy generation using controlled power kites."* Control Systems Technology. 2010.

Mario Milanese and Lorenzo Fagiano. *"Controlled airfoils for vessel on-board energy production"* OPTEC, Katholieke Universiteit Leuven, 26 Mayo 2009.

KitVes Project. *"Controlled airfoils for vessel on-board energy production"*

M.Milanese. *"Optimization and control of an hybrid kite boat"*, WORLD IFAC (International Federation of Automatic Control) CONGRESS, on September 2011.

Eirik Bøckmann, Sverre Steen. *"Wind Turbine Propulsion of Ships."* Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway. June 2011.

Hansen, M.O.L. *"Aerodynamics of Wind Turbines."* (2008). Earthscan.

Asker, G. C. F. *'Roller Furling Genoa and Rigid Surface Wingsail, a Flexible Practical Wind-Assist System for Commercial Vessels'*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 20:61–81. (1985).

Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, June 2011

Juan Cristobal Antezana Nuñez. *"Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje vertical"* Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Dpto. de ingeniería eléctrica. Sept 2004.

Organización Marítima Internacional: <http://www.imo.org/Pages/home.aspx>

MEPC.203 (62)

MEPC.1/Circ.684

Climatology of Global Ocean Winds. (COGOW):

<http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/>

[http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/cogow\\_user\\_manual.pdf](http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/cogow_user_manual.pdf)

The Energy Network. Energia Power:

<http://energiapower.com/energiashop/pages.php?pageid=3&mode=preview>

Energy Insight, Renewable energy news, views and resources:

[http://www.energyinsight.info/wind\\_power\\_ferry.html](http://www.energyinsight.info/wind_power_ferry.html)

Danish Meteorological Institute:

<http://www.weatherrouteing.dk/routeing/>

[http://weatherrouting.dk/fileadmin/PDF\\_Filer/SeaPlanner.pdf](http://weatherrouting.dk/fileadmin/PDF_Filer/SeaPlanner.pdf)

Cruceros Wind Star: [www.windstarcruises.com/](http://www.windstarcruises.com/)

Museo Técnico Alemán. Berlin; <http://www.sdtb.de/Flettner-Rotor.1623.0.html>

Nasa Lift of a Rotating cylinder, and simulator:

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/cyl.html>

Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering. ISSN: 1792-4707 31 ISBN: 978-960-474-222-6

Rotores Thiiink: [www.thiiink.com](http://www.thiiink.com)

Revista Horizons Junio 2010 Issue 29 Lloyd's Register:

[http://www.lr.org/Images/Horizons%20no%2029\\_tcm155-199091.pdf](http://www.lr.org/Images/Horizons%20no%2029_tcm155-199091.pdf)

Fairtransport: <http://www.fairtransport.eu/>

Solarsailor: <http://www.solarsailor.com/hmp-solutions/large-shipping/>

CargoXpress: <http://www.cargoxpress.eu/espanol/>

Skysails: <http://www.skysails.info/english/>

Kiteship: <http://www.kiteship.com/marine.php>

<sup>i</sup> M. M. Diehl, L. Magni, and G. De Nicolao. Efficient NMPC of unstable periodic systems using approximate infinite horizon closed loop costing. *Annual Reviews in Control*, 2004.

L. Fagiano. Control of Tethered Airfoils for High-Altitude Wind Energy Generation. PhD thesis, Politecnico di Torino, Torino, 2009.

A. Ilzhöfer, B. Houska, and M. M. Diehl. Nonlinear MPC of kites under varying wind conditions for a new class of large scale wind power generators. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 17(17):1590{1599, 2007.

B. Houska and M. M. Diehl. Optimal control for power generating kites. In *9th European Control Conference*, Greece, 2007.

B. Houska and M. M. Diehl. Robustness and stability optimization of power generating kite systems in a periodic pumping mode. In *IEEE Multi - Conference on Systems and Control*, Yokohama, Japan, 2010.

P. Williams, B. Lansdorp, and W. J. Ockels. Nonlinear control and estimation of a tethered kite in changing wind conditions. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2008.

**ANEXOS****ANEXO A: Buques a motor asistidos por viento mediante velas convencionales.****a) Características del buque “Wind Spirit”****Figura 120: Buque Spirit.**

Eslora Total:	134 metros
Calado:	4,1 metros
Tonelaje:	5.736 GRT
Manga:	15,8 metros
Velas:	6 triangulares, auto-enrollables, operadas por computadora 2.200 $m^2$ de poliéster Dacron, una fibra sintética.
Mástiles:	4 a 62 metros
Motores:	3 generadores diesel electric, y 1 propulsor motor eléctrico.
Velocidad:	11 nudos con maquina solo, y hasta 15,8 nudos solo con viento.



## b) Características del buque "Wind Star"

**Figura 121: Buque WindStar.**

Eslora Total:	134 metros
Calado:	4,1 metros
Tonelaje:	5.703 GT
Manga:	15,8 metros
Velas:	6 triangulares, auto-enrollables, operadas por computadora 2.200 $m^2$ de poliéster Dacron, una fibra sintética.
Mástiles:	4 a 62 metros
Motores:	3 generadores diesel electric, y 1 propulsor motor eléctrico.
Velocidad:	11 nudos con maquina solo, y hasta 15,8 nudos solo con viento.
Capacidad:	148 Pasajeros
Tripulación:	90 internacional.
Registro del buque:	Bahamas.

## c) Características del buque “Wind Surf”.

**Figura 122: Buque WindSurf**

Eslora Total:	187 metros
Calado:	5 metros
Tonelaje:	14.745 GRT
Manga:	20 metros
Velas:	7 triangulares, auto-enrollables, operadas por computadora 2.600 $m^2$ de poliéster Dacron, una fibra sintética.
Mástiles:	5 a 50 metros del nivel del mar.
Motores:	4 generadores diesel electric, y 2 propulsores eléctricos.
Velocidad:	10-12 nudos con maquina solo, y hasta 15 nudos con viento auxiliado con máquina.
Capacidad:	312 Pasajeros
Tripulación:	191 Internacional.
Registro del buque:	Bahamas.

**Anexo B: Influencia de la relación entre la velocidad del buque y la velocidad del viento verdadero, sobre la velocidad del viento aparente.**<sup>235</sup>

Tabla 29: Velocidad del buque igual a la del viento verdadero.				
Va	Vv	Vb	Avv	Ava
20	10	10	0	0
19,92	10	10	10	5
19,7	10	10	20	10
19,32	10	10	30	15
18,79	10	10	40	20
18,13	10	10	50	25
17,32	10	10	60	30
16,38	10	10	70	35
15,32	10	10	80	40
14,14	10	10	90	45
12,86	10	10	100	50
11,47	10	10	110	55
10	10	10	120	60
8,45	10	10	130	65
6,84	10	10	140	70
5,18	10	10	150	75
3,47	10	10	160	80
1,74	10	10	170	85
0	10	10	180	90

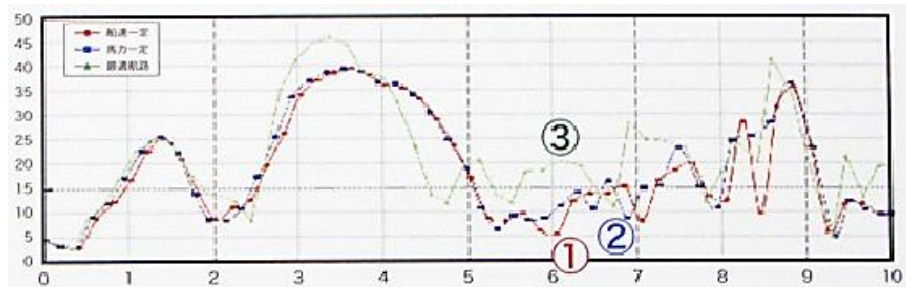
<sup>235</sup> <http://www.arganeo.com.es/calculadora/CALCULO%20VIENTO%20REAL%20Y%20APARENTE.htm>

La Escuela Náutica y de Navegación Arganeo, tiene una aplicación para calcular de viento real y aparente en función de la velocidad del buque.

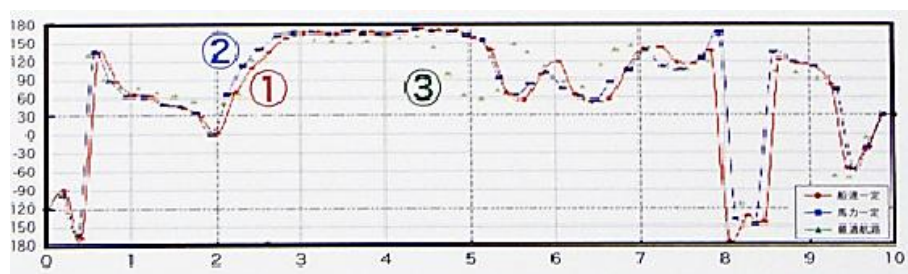
<b>Tabla 30: Velocidad del viento el doble que la velocidad del buque.</b>				
<b>Va</b>	<b>Vv</b>	<b>Vb</b>	<b>Avv</b>	<b>Ava</b>
30	20	10	0	0
29,9	20	10	10	6,67
29,6	20	10	20	13,36
29,09	20	10	30	20,05
28,4	20	10	40	26,92
27,52	20	10	50	33,84
26,46	20	10	60	40,89
25,24	20	10	70	48,14
23,86	20	10	80	55,63
22,36	20	10	90	63,43
20,75	20	10	100	71,67
19,06	20	10	110	80,46
17,32	20	10	120	90
15,58	20	10	130	100,56
13,91	20	10	140	112,48
12,39	20	10	150	126,21
11,14	20	10	160	142,12
10,3	20	10	170	160,29
10	20	10	180	180

<b>Tabla 31: Velocidad del buque el doble que la velocidad del viento.</b>				
<b>Va</b>	<b>Vv</b>	<b>Vb</b>	<b>Avv</b>	<b>Ava</b>
30	10	20	0	0
29,9	10	20	10	3,33
29,6	10	20	20	6,64
29,09	10	20	30	9,9
28,4	10	20	40	13,08
27,52	10	20	50	16,16
26,46	10	20	60	19,11
25,24	10	20	70	21,86
23,86	10	20	80	24,37
22,36	10	20	90	26,56
20,75	10	20	100	28,33
19,06	10	20	110	29,54
17,32	10	20	120	30
15,58	10	20	130	29,44
13,91	10	20	140	27,52
12,39	10	20	150	23,79
11,14	10	20	160	17,88
10,3	10	20	170	9,71
10	10	20	180	0

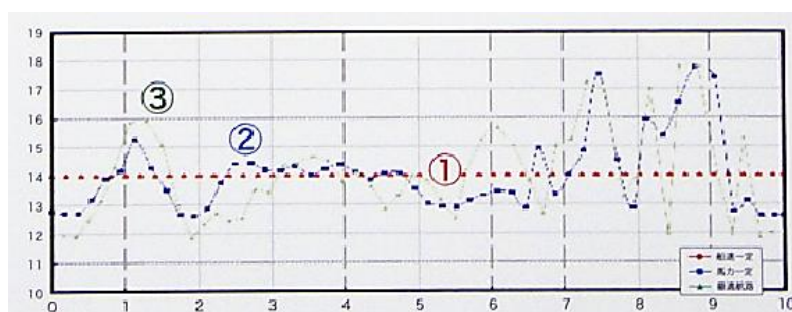
**Anexo C: Historiales en una travesía de Yokohama a Seattle con cascada de velas propuestas por UT WindChallenger.**



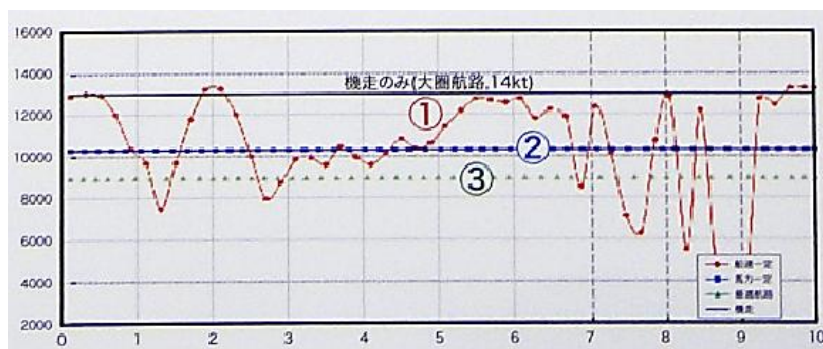
**Figura 123: Historial de la velocidad del viento verdadero.**



**Figura 124: Historial del ángulo del viento verdadero.**



**Figura 125: Historial de la velocidad del buque.**



**Figura 126: Historial de la potencia de la máquina.**

**ANEXO D: Especificaciones del buque CargoXpress con vela estructural solar.****Datos Básicos**

Empresa	E.E.I.G. CargoXpress Maritime
Entrega	2014 – 2015
Tipo -	Catamarán Buque Multi-Propósito, capacidad 200 TEU
Clasificación	de acuerdo con IMO HSC 2000 & DNV HSLC
"Class sign"	"1A2 R1 LC Cargo A Gas Fuelled 200 TEU"

**Dimensiones Principales**

Eslora total	84,00m
Eslora entre. perp.	80,10m
Manga	21,00m
Profundidad a cubierta principal	10,00m
"Design draught 75 %"	4,10m
"Air draught" (mástil excluido)	26,30m

**Tonelaje**

"Gross Tonnage" (ITC69) aprox.	9.200 GT
"Net Tonnage" (ITC 69) aprox.	2.800 NT

**Deadweight**

Diseño aprox.	2.000 tdw
---------------	-----------

**Velocidad**

V. Servicio- 90% MCR,15% "sea margin wind Bft 2,des.dr."	12 nudos
V. Con propulsión del viento	10-12 nudos

**Cruising Range**

Sólo motor aprox.	1.000 nm
Navegación adicional aprox.	1.800 nm.

**Capacidades**

Tanques LNG	5 días, 1000mn 37 m <sup>3</sup> , en contenedores
Lub.-oil	2 m <sup>3</sup> , en contenedores
Agua dulce	5 m <sup>3</sup> , en contenedores
Aguas residuales	5 m <sup>3</sup> , en contenedores
Basura etc	3 m <sup>3</sup> , en contenedores
Agua de lastre	0 m <sup>3</sup>

**Superestructura con Cabina, grúa, vela**

Grúa STS a bordo, que cubre todo el buque	
Superestructura móvil	50 m
Superestructura rotativa en eje z	360 grados
Apertura vela	85 grados
Grúa de puente	40t alcance 20m
Grúa de puente	20t alcance 40m
Grúa rotativa	60m "project cargo"
Spreader Auto.	20/40pies



**Capacidad de Carga**

Contenedores	200 TEU
Dimensiones "Project Cargo"	55*15*10m
Peso "Project Cargo"	aprox. 1600t
Tipos de carga Contenedores y "Project Cargo"	

**Maquinaria/Propulsión**

Motor principal aprox.	1,2 MW Genset, en contenedores
Vela aprox.	700 kW, 46% del tiempo
Propulsión Variante 1	2* 500 kW "Podded Drives"
Propulsión Variante 2	2* 500 kW "Rim-Drives"
"Bow Thrusters"	2* 500 kW

**Potencia eléctrica suplementaria**

Motor principal aprox.	200 kW
Paneles solares 1200 m <sup>2</sup> , promedio	800 kWh/d
Baterías	2000 kWh, en contenedores
"Shore Power"	contacto instalado
Batería Superestructura	500 kWh

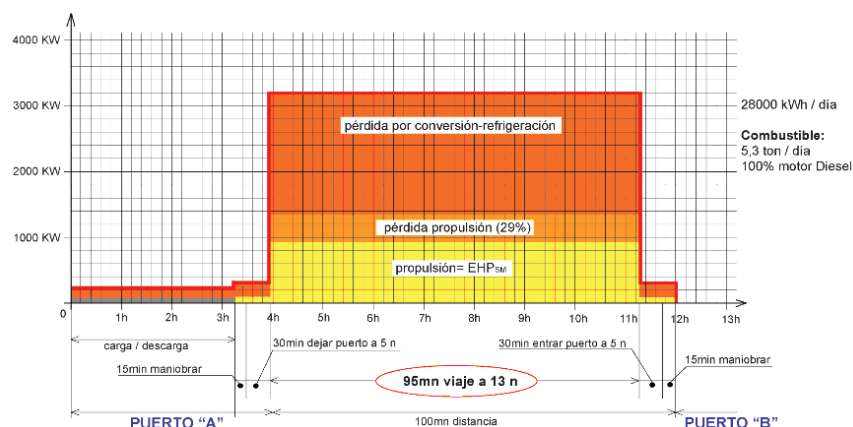


**Figura 127: Buque CargoXpress con vela estructural solar.**

### Escenarios energéticos

#### a) Buque tradicional tipo feeder con eje principal y timón:

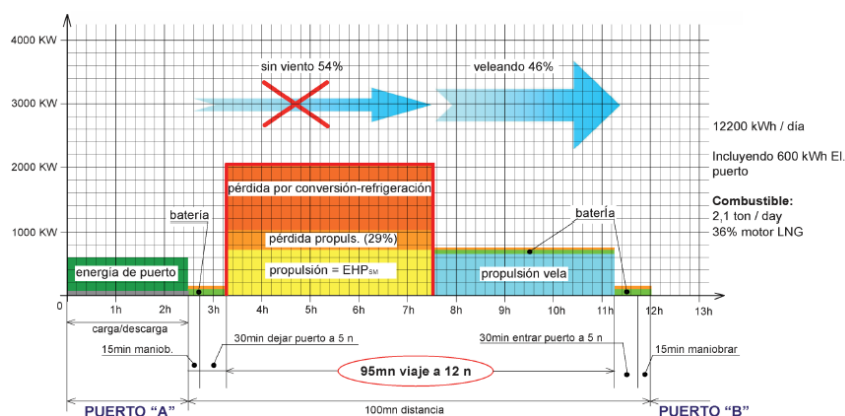
1x2MW + 1x500KW motor (SM)  
 13 nudos de velocidad, 3,2 hrs en puerto debido a grúas tipo gib  
 28.000 kWh/día  
 Combustible 5,3ton/día  
 100% motor diesel



**Figura 128: Escenario energético de buque tradicional tipo feeder .**

#### b) Buque CargoXpress con vela y propulsión eléctrica Pods

LNG 1.2MW Genset + 1500 kW Battery Pack (SM)  
 12 nudos de velocidad  
 12.200kwh/ día.  
 Incluyendo 600 kWh el Puerto  
 Combustible: 2,1 ton/ día  
 38 % motor LNG.



**Figura 129: Escenario energético con buque CargoXpress.**

La Universidad de Madrid estudió 6 áreas de operación desde el Báltico al Oeste de África, la intensidad del sol y las distintas situaciones. Revestimiento de los 1200 m<sup>2</sup> de la vela con estas placas solares como en " Planet Solar " con 164W/m2. Uso de la energía obtenida para abastecer la Superestructura y la cabina. Almacenamiento de la energía sobrante en

baterías de 500kWh. El buque es capaz de viajar de Trípoli a Alejandría a 7 nudos durante el día. Usando la potencia del viento, con la vela abierta, la eficiencia de la energía solar disminuye

Location	Boat speed = 15 knots		Boat speed = 13 knots		Boat speed = 10 knots	
	Power (kW)	Prob (%)	Power (kW)	Prob (%)	Power (kW)	Prob (%)
Kiel-Riga	750	42	658	45	511	52
Aberdeen-Dunkerque	897	41	787	44	622	49
A Coruña-Bordeaux	974	42	872	46	697	48
Marseille-Cartagena	761	40	655	42	511	46
Alexandria-Tripoli	722	39	635	42	512	47
Lobito-Banana	1025	50	902	50	723	51
Mean Values	855	42	752	45	596	49

**Tabla 32: Energía eólica anual por día en las distintas rutas.**



**Figura 130: Perfil del buque CargoXpress.**

ACCIONA Trasmediterránea participa también en otros proyectos de I+D+i relacionados con el transporte sostenible y la eficiencia energética, dentro del 7º programa marco: SILENV, GRIP, RETROFIT.

Las conclusiones del proyecto fueron publicadas el 30 de Marzo de 2012.

**Anexo E: Velas rígidas propuestas por Wärtsilä**

**Figura 131: Velas rígidas propuestas por Wärtsilä.**

**ANEXO F: Diversas distribuciones de los rotores propuestos por Thiiink.**

a) Buque con tres rotores abatibles.

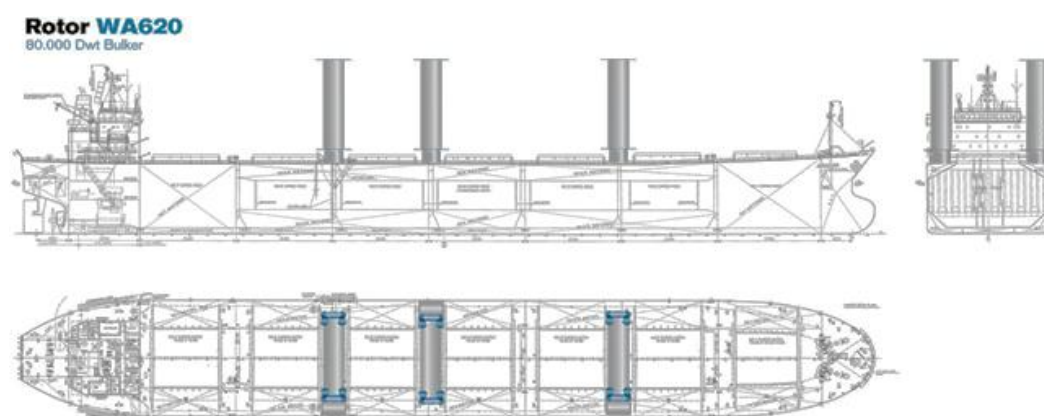


Figura 132: Proyecciones ortogonales del buque propuesto con 3 rotores <sup>236</sup>

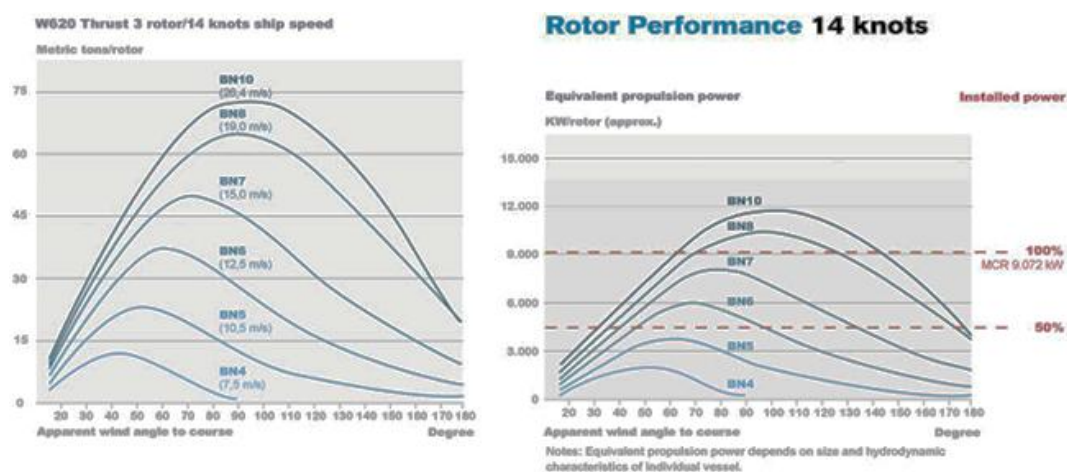
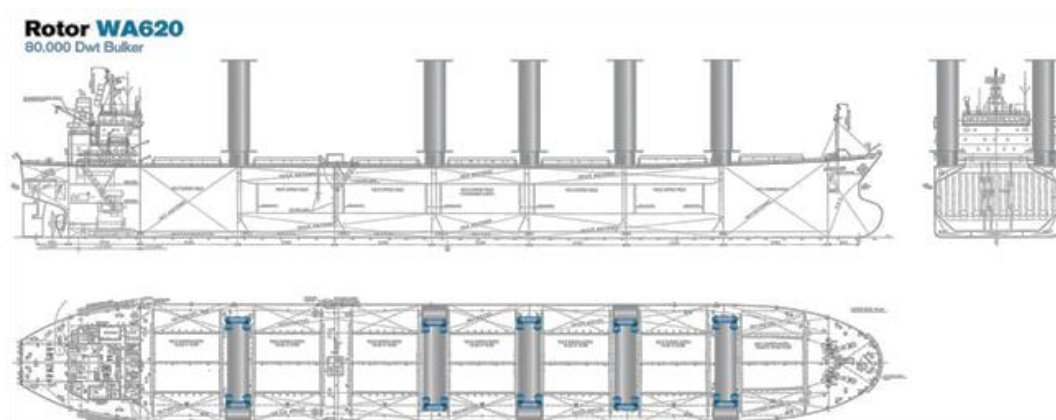
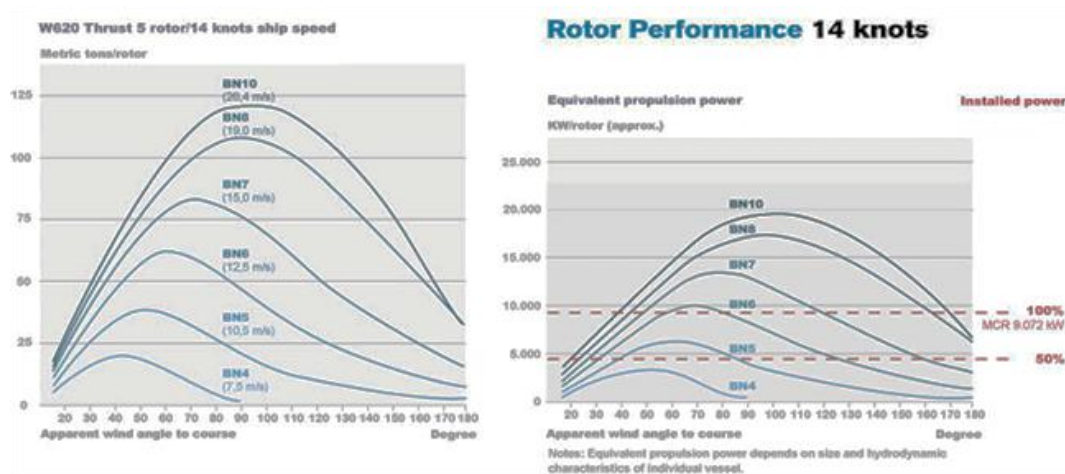


Figura 133: Empuje y rendimiento de 3 rotores. <sup>237</sup>

<sup>236</sup> Fuente: <http://www.thiiink.com/rotor-performance-2-2/> Junio 2012.

<sup>237</sup> Fuente: <http://www.thiiink.com/rotor-performance-2-2/> Junio 2012.

## b) Buque con cinco rotores abatibles.

Figura 134: Proyecciones ortogonales del buque propuesto con 5 rotores.<sup>238</sup>Figura 135: Empuje y rendimiento de 5 rotores.<sup>239</sup><sup>238</sup> Fuente: <http://www.thiink.com/propeller-performance-i/> Junio 2012<sup>239</sup> Fuente: <http://www.thiink.com/propeller-performance-i/> Junio 2012



c) Buque con seis rotores abatibles.

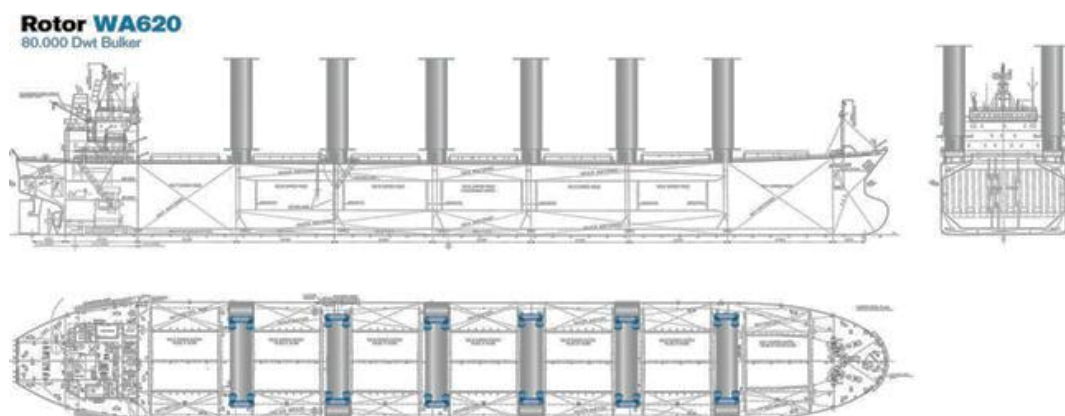


Figura 136: Proyecciones ortogonales del buque propuesto con 6 rotores.<sup>240</sup>

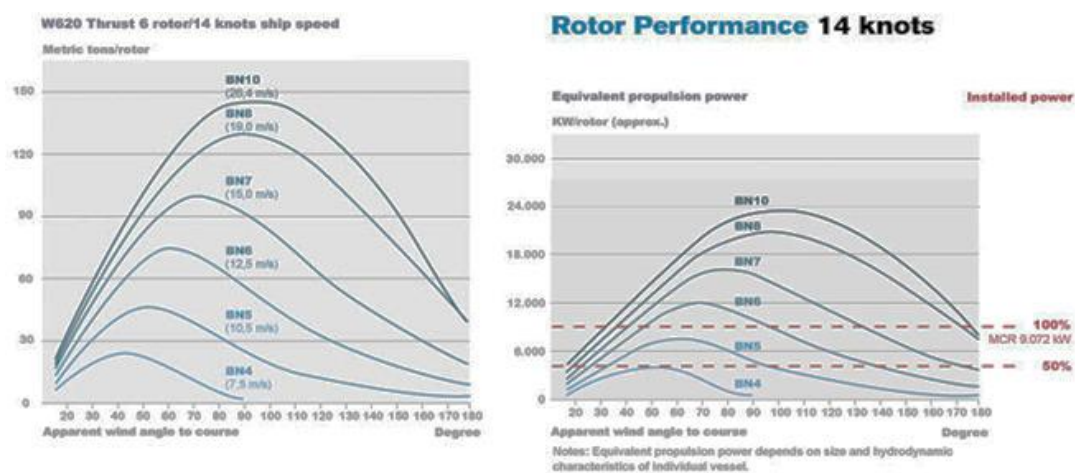


Figura 137: Empuje y rendimiento de 6 rotores.<sup>241</sup>

<sup>240</sup> Fuente: <http://www.thiink.com/rotor-performance/rotor-performance-5/> Junio 2012.

<sup>241</sup> Fuente: <http://www.thiink.com/rotor-performance/rotor-performance-5/> Junio 2012



**Anexo G: Ejemplo de cálculo de fuerzas ejercidas sobre una cometa de  $500m^2$ .**

Considerando un ángulo de incidencia del viento de  $15^\circ$  y un área total de la cometa de 200 metros cuadrados, tenemos la posibilidad de calcular los valores de la sustentación de la resistencia y de las fuerzas aerodinámicas totales.

Se han considerado los siguientes valores:

$$C_L = 0,9250 \text{ (Coeficiente de sustentación)}$$

$$C_D = 0,2421 \text{ (Coeficiente de resistencia)}$$

Ambos coeficientes están basados en el ángulo de incidencia de  $15^\circ$  en el perfil aerodinámico G 417-a que fue seleccionado.

$$\rho = 1,2047 \text{ Kg}/m^3 \text{ (densidad del aire)}$$

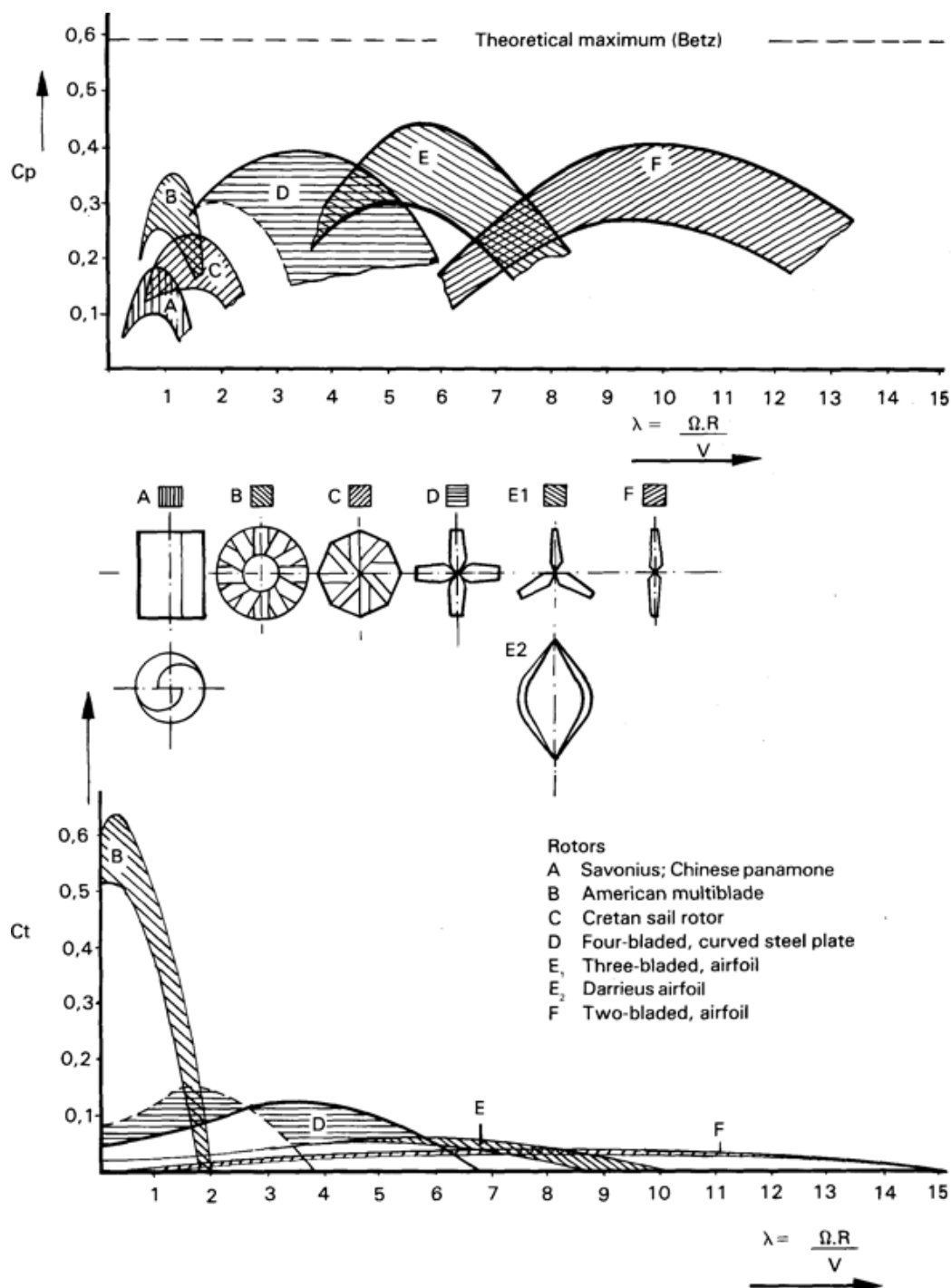
$$w = 15 \text{ m/s} \text{ (velocidad del viento)}$$

$$A_k = 200 \text{ m}^2 \text{ (Área total del kite)}$$

La dirección y fuerza del viento son consideradas constantes.

Por tanto, el valor total de la fuerza aerodinámica  $T_{af}$ , para el perfil del kite descrito arriba es de 22.029,116 N y el valor de la fuerza de resistencia  $D = 6.562,302 \text{ N}$ .

**ANEXO H: Representación de los coeficientes de rendimiento en función de la velocidad específica para los diferentes tipos de aerogeneradores de eje vertical.<sup>242</sup>**



<sup>242</sup> Fuente:

<http://s407.photobucket.com/albums/pp159/koenz/?action=view&current=AH810E173.gif&mediafilter=images>

**ANEXO I: Estadística del viento en la ruta por el Atlántico Norte.**

Wind Direction vs Speed from QuikSCAT Daily Observations (2000-2009)

Nº Total de observaciones = 150

Punto A		01-15 Enero						LAT 40,25N LONG 300,25E	
$DV_V$	$V_V$	5,0 ≤ 10,0 ≤ 15,0 ≤ 20,0 ≤ 25,0 < 25,0						Porcentaje Total	
N		0,00	0,00	0,00	2,67	0,00	0,00	2,67	
NNE		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NE		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ENE		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
E		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ESE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	
SE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	
SSE		0,00	0,00	0,67	0,67	0,00	0,00	1,33	
S		0,00	0,00	0,00	0,67	1,33	0,00	2,00	
SSW		0,67	0,00	1,33	1,33	0,67	0,00	4,00	
SW		0,00	0,00	0,67	4,67	3,33	4,00	12,67	
WSW		0,00	0,00	0,67	2,67	6,67	3,33	13,33	
W		0,00	0,00	1,33	4,67	11,33	10,67	28,00	
WNW		0,00	0,00	0,00	2,67	8,00	8,00	18,67	
NW		0,00	0,00	0,67	4,67	4,00	1,33	10,67	
NNW		0,00	0,00	0,67	2,00	2,67	0,00	5,33	
Total Percent		0,67	0,00	6,00	28,00	38,00	27,33	100,0	
Total Percent Fav.		0,67	0,00	6,00	24,66	38,00	27,33	96,7	

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{AB} \pm 60^\circ$	95,9 %	90 %	65,3 %

Punto B		01-15 Enero						LAT 44,25N LONG 312,25E	
$DV_V$	$V_V$	5,0 ≤ 10,0 ≤ 15,0 ≤ 20,0 ≤ 25,0 < 25,0						Porcentaje Total	
N		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NNE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	
NE		0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	
ENE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	
E		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ESE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	
SE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	
SSE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	
S		0,00	0,00	0,67	1,33	2,00	0,00	4,00	
SSW		0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	1,33	2,00	
SW		0,00	0,00	1,33	4,00	8,00	4,67	18,00	
WSW		0,00	0,00	0,00	5,33	14,67	10,00	30,00	
W		0,00	0,00	1,33	8,00	9,33	4,67	23,33	
WNW		0,00	0,00	0,00	5,33	6,00	3,33	14,67	
NW		0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	1,33	3,33	
NNW		0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	
Total Percent		0,00	0,00	3,33	27,33	44,00	25,33	100,0	
Total Percent Fav.		0,00	0,00	3,33	25,23	43,33	25,33	97,22	

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{BC} \pm 60^\circ$	97,2 %	93,9 %	68,66 %

Punto C	01-15 Enero							LAT 48,25N LONG 330,75E
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$						Porcentaje Total
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NNE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ENE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	0,67
ESE	0,00	0,00	0,00	1,33	1,33	0,00	2,67	2,67
SE	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	0,67
SSE	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	2,00	2,00
S	0,00	0,00	0,00	2,67	0,00	0,00	2,67	2,67
SSW	0,00	0,00	1,33	5,33	4,00	1,33	12,00	12,00
SW	0,00	0,00	0,67	0,67	4,00	10,67	16,00	16,00
WSW	0,00	0,00	0,00	1,33	9,33	20,00	30,67	30,67
W	0,00	0,00	0,00	1,33	8,00	14,67	24,00	24,00
WNW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	6,00	6,67	6,67
NW	0,00	0,00	0,00	1,33	0,00	0,00	1,33	1,33
NNW	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67
Total Percent	0,00	0,00	2,67	17,33	27,33	52,67	100,0	
Total Percent favorable	0,00	0,00	2,67	12,66	26	52,67	94	

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{CD} \pm 60^\circ$	94 %	91,3 %	78,67 %

Punto D	01-15 Enero				LAT 34,25N LONG 342,25E			
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0$	$10,0 \leq 15,0$	$15,0 \leq 20,0$	$20,0 \leq 25,0$	$25,0 < 25,0$	Porcentaje Total	
N		0,00	0,67	3,33	3,33	0,00	0,00	7,33
NNE		0,00	1,33	4,00	2,67	0,00	0,00	8,00
NE		0,00	1,33	3,33	4,67	0,00	0,00	9,33
ENE		0,00	3,33	6,67	6,00	0,67	0,00	16,67
E		0,00	4,67	3,33	2,67	0,00	0,00	10,67
ESE		0,00	1,33	2,67	0,00	0,00	0,00	4,00
SE		0,00	0,67	0,67	1,33	0,00	0,00	2,67
SSE		0,00	1,33	1,33	0,00	0,00	0,00	2,67
S		0,67	1,33	0,67	0,00	0,00	0,00	2,67
SSW		0,00	1,33	0,00	1,33	0,00	0,00	2,67
SW		0,00	1,33	2,00	2,67	0,67	0,00	6,67
WSW		0,00	0,67	2,00	4,00	0,00	0,00	6,67
W		0,00	0,00	0,67	1,33	0,00	0,00	2,00
WNW		0,00	0,00	0,67	0,00	1,33	0,00	2,00
NW		0,00	0,67	5,33	3,33	0,67	0,00	10,00
NNW		0,00	0,00	4,67	0,67	0,67	0,00	6,00
Total Percent		0,67	20,00	41,33	34,00	4,00	0,00	100,0
TP Favorable		0,67	16,67	36	24,67	2	0,00	80

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{EF} \pm 60^\circ$	62,67 %	26,67 %	2 %

Punto F	01-15 Enero						LAT 30,25N LONG 330,25E	
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0$	$10,0 \leq 15,0$	$15,0 \leq 20,0$	$20,0 \leq 25,0$	$25,0 < 25,0$	Porcentaje Total	
N		0,00	3,33	3,33	0,00	0,00	0,00	6,67
NNE		0,00	2,00	6,67	4,00	2,00	0,00	14,67
NE		0,00	1,33	6,00	2,67	2,00	0,00	12,00
ENE		0,00	4,67	6,67	0,67	0,00	0,00	12,00
E		0,67	2,67	4,67	6,00	0,00	0,00	14,00
ESE		0,00	4,67	3,33	6,00	0,00	0,00	14,00
SE		0,00	2,67	2,00	1,33	0,00	0,00	6,00
SSE		0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33
S		0,67	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00
SSW		0,00	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33
SW		0,00	0,00	0,67	0,67	0,00	0,00	1,33
WSW		0,67	0,67	1,33	0,67	0,00	0,00	3,33
W		0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67
WNW		0,00	0,67	0,00	0,67	0,00	0,00	1,33
NW		1,33	0,00	2,67	0,00	0,00	0,00	4,00
NNW		0,00	2,00	2,00	1,33	0,00	0,00	5,33
Total Percent		4,00	28,00	40,00	24,00	4,00	0,00	100,0 %
Total Favorable		3,33	25,33	37,33	21,99	4,00	0,00	91,98 %

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{FG} \pm 60^\circ$	63,32 %	22 %	4 %



	Punto G	01-15 Enero					LAT 28,25N LONG 318,25E	
	$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$					Porcentaje Total
N		0,00	2,00	1,33	0,00	0,67	0,00	4,00
NNE		0,00	1,33	2,00	0,00	0,67	0,00	4,00
NE		0,00	2,67	4,67	2,00	1,33	0,00	10,67
ENE		0,67	2,00	6,67	6,00	1,33	0,00	16,67
E		0,00	7,33	4,67	6,67	0,67	0,00	19,33
ESE		0,00	1,33	2,00	4,00	2,00	0,00	9,33
SE		0,00	2,67	2,67	0,67	2,00	0,00	8,00
SSE		1,33	3,33	2,00	0,00	0,00	0,00	6,67
S		0,00	1,33	5,33	0,00	0,00	0,00	6,67
SSW		0,00	0,67	2,67	0,00	0,00	0,00	3,33
SW		0,00	0,00	1,33	0,00	0,00	0,00	1,33
WSW		0,00	0,67	2,00	0,67	0,00	0,00	3,33
W		0,00	0,67	1,33	0,00	0,00	0,00	2,00
WNW		0,00	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	1,33
NW		0,00	0,00	0,67	0,67	0,00	0,00	1,33
NNW		0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00
Total Percent		2,00	28,67	40,00	20,67	8,67	0,00	100,0
Total Favorable		2,00	24,67	35,33	19,33	8,67	0,00	90 %

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{GH} \pm 60^\circ$	63,33 %	28 %	8,67 %

Punto A	01-15 Abril						LAT 40,25N LONG 300,25E	
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0$	$10,0 \leq 15,0$	$15,0 \leq 20,0$	$20,0 \leq 25,0$	$25,0 < 25,0$	Porcentaje Total	
N		0,00	0,00	2,00	2,67	0,67	0,67	6,00
NNE		0,00	0,00	1,33	4,67	1,33	0,00	7,33
NE		0,00	0,00	0,67	3,33	2,00	0,00	6,00
ENE		0,00	0,67	1,33	0,67	0,00	0,00	2,67
E		0,00	0,00	0,00	0,67	0,67	0,00	1,33
ESE		0,00	0,00	0,00	1,33	0,67	0,00	2,00
SE		0,00	0,00	1,33	0,67	0,67	0,00	2,67
SSE		0,00	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	2,00
S		0,00	0,00	0,00	1,33	2,00	0,00	3,33
SSW		0,00	0,00	3,33	1,33	2,67	1,33	8,67
SW		0,00	0,67	2,00	4,00	2,00	0,67	9,33
WSW		0,00	0,00	2,67	3,33	2,67	0,00	8,67
W		0,00	0,00	2,67	2,67	6,67	2,00	14,00
WNW		0,00	0,00	0,67	2,67	5,33	0,00	8,67
NW		0,00	0,00	1,33	4,00	4,67	0,00	10,00
NNW		0,00	0,00	0,67	0,67	5,33	0,67	7,33
Total Percent		0,00	2,00	20,67	34,67	37,33	5,33	100,0
Total Favorable		0,00	1,33	15,34	21,33	31,99	4,66	74,65 %

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{AB} \pm 60^\circ$	73,32 %	57,98 %	36,65 %

Punto B	01-15 Abril						LAT 44,25N LONG 312,25E	
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$						Porcentaje Total
N		0,00	0,00	0,00	1,33	2,67	0,67	4,67
NNE		0,67	1,33	0,67	3,33	1,33	0,00	7,33
NE		0,00	0,00	2,00	1,33	0,67	0,67	4,67
ENE		0,00	0,00	3,33	0,67	0,00	0,67	4,67
E		0,00	1,33	1,33	0,00	0,67	0,00	3,33
ESE		0,00	0,00	1,33	0,67	0,00	0,00	2,00
SE		0,00	0,00	2,67	0,67	0,00	0,00	3,33
SSE		0,00	0,00	2,00	0,67	0,00	0,00	2,67
S		0,00	0,67	1,33	2,67	0,00	0,00	4,67
SSW		0,00	0,00	6,00	2,00	0,00	0,00	8,00
SW		0,00	0,00	3,33	4,67	0,67	0,00	8,67
WSW		0,00	0,67	4,00	5,33	1,33	2,00	13,33
W		0,00	0,00	2,00	4,67	2,00	0,67	9,33
WNW		0,00	0,00	3,33	2,67	1,33	0,00	7,33
NW		0,00	0,00	2,00	2,00	2,67	2,00	8,67
NNW		0,00	0,67	2,00	3,33	1,33	0,00	7,33
Total Percent		0,67	4,67	37,33	36,00	14,67	6,67	100,0
Total Favorable		0	2	28,67	28,67	9,33	4,66	73,33 %
		Velocidades $\geq 10 \text{ }^m/s$			Velocidades $\geq 15 \text{ }^m/s$		Velocidades $\geq 20 \text{ }^m/s$	
$R_{BC} \pm 60^\circ$		71,33 %			42,6 %		14 %	

Punto C		01-15 Abril				LAT 48,25N LONG 330,25E		
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$						Porcentaje Total
N		0,00	0,67	2,67	3,33	0,00	0,00	6,67
NNE		0,00	0,00	0,00	0,67	2,00	0,00	2,67
NE		0,00	0,00	1,33	2,00	2,00	0,67	6,00
ENE		0,00	0,00	1,33	0,67	2,00	1,33	5,33
E		0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	0,67	2,00
ESE		0,00	0,00	2,00	1,33	2,00	0,00	5,33
SE		0,00	0,00	2,67	2,00	2,00	0,00	6,67
SSE		0,00	0,00	0,67	2,00	0,67	0,00	3,33
S		0,00	1,33	2,00	3,33	1,33	0,00	8,00
SSW		0,00	0,00	1,33	2,00	0,67	0,00	4,00
SW		0,00	0,00	2,67	2,00	2,67	0,00	7,33
WSW		0,00	0,00	2,67	3,33	2,00	0,00	8,00
W		0,00	0,00	0,67	2,67	4,00	4,00	11,33
WNW		0,00	0,67	1,33	5,33	2,67	3,33	13,33
NW		0,00	0,00	1,33	2,67	0,00	1,33	5,33
NNW		0,00	0,00	3,33	1,33	0,00	0,00	4,67
Total Percent		0,00	2,67	26,67	34,67	24,67	11,33	100,0
Total Favorable		0,00	2,67	18	26,67	15,33	8,66	71,33%

	Velocidades $\geq 10 \text{ } m/s$	Velocidades $\geq 15 \text{ } m/s$	Velocidades $\geq 20 \text{ } m/s$
$R_{CD} \pm 60^{\circ}$	68,66 %	50,66 %	24 %

Punto E		01-15 Abril						LAT 34,25N LONG 342,25E	
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$						Porcentaje Total	
N		0,00	4,67	4,67	4,67	0,67	0,00	14,67	
NNE		0,00	2,00	4,67	3,33	1,33	0,00	11,33	
NE		0,00	0,67	5,33	7,33	0,00	0,00	13,33	
ENE		0,00	1,33	1,33	4,67	0,00	0,00	7,33	
E		0,00	0,67	2,00	0,67	0,00	0,00	3,33	
ESE		0,00	1,33	2,00	0,00	0,00	0,00	3,33	
SE		0,00	1,33	1,33	0,67	0,00	0,00	3,33	
SSE		0,00	3,33	0,00	0,00	0,00	0,00	3,33	
S		0,00	0,67	0,00	1,33	0,00	0,00	2,00	
SSW		0,00	0,67	0,67	2,67	0,67	0,00	4,67	
SW		0,00	1,33	1,33	2,67	0,67	0,67	6,67	
WSW		0,00	0,00	2,00	0,67	1,33	0,67	4,67	
W		0,00	0,00	0,67	1,33	0,00	0,67	2,67	
WNW		0,00	0,00	0,67	2,00	0,00	0,67	3,33	
NW		0,00	0,67	2,00	2,67	2,67	0,00	8,00	
NNW		0,00	2,00	2,67	3,33	0,00	0,00	8,00	
Total Percent		0,00	20,67	31,33	38,00	7,33	2,67	100,0	
Total Favorable		0,00	18,67	26	28,6	4,66	0	77,93	
		Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$						Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	
$R_{EF} \pm 60^\circ$		59,26 %						33,26 %	
								Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$	
								4,66 %	

Punto F	01-15 Abril				LAT 30,25N LONG 330,25E			
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0$	$10,0 \leq 15,0$	$15,0 \leq 20,0$	$20,0 \leq 25,0$	$25,0 < 25,0$	Porcentaje Total	
N	0,00	0,00	2,00	6,00	0,67	0,00	8,67	
NNE	0,00	1,33	5,33	3,33	0,67	0,00	10,67	
NE	0,00	2,67	3,33	1,33	0,67	0,00	8,00	
ENE	0,00	1,33	5,33	2,67	0,00	0,00	9,33	
E	0,00	1,33	4,00	0,67	0,00	0,00	6,00	
ESE	0,00	2,00	2,00	0,67	0,00	0,00	4,67	
SE	0,00	0,67	4,00	0,00	0,00	0,00	4,67	
SSE	0,67	0,00	1,33	0,67	0,00	0,00	2,67	
S	0,00	0,00	1,33	2,00	0,00	0,00	3,33	
SSW	0,00	0,00	2,67	0,67	0,00	0,00	3,33	
SW	0,00	0,67	2,00	0,00	0,00	0,00	2,67	
WSW	0,00	0,00	2,67	0,00	0,00	0,00	2,67	
W	0,67	0,67	2,67	0,00	1,33	0,00	5,33	
WNW	0,00	2,00	7,33	1,33	2,00	0,00	12,67	
NW	0,00	0,67	3,33	1,33	2,00	0,67	8,00	
NNW	0,00	0,00	4,00	3,33	0,00	0,00	7,33	
Total Percent	1,33	13,33	53,33	24,00	7,33	0,67	100,0	
Total Favorable	0,67	10	36	22,00	4	0,67	73,34	

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{FG} \pm 60^\circ$	62,6 %	26,6 %	4,6 %

Punto G		01-15 Abril						LAT 28,25N LONG 318,25E	
$DV_V$	$V_V$	5,0 ≤ 10,0 ≤ 15,0 ≤ 20,0 ≤ 25,0 < 25,0						Porcentaje Total	
N		0,00	2,67	0,67	0,67	1,33	0,00	5,33	
NNE		0,00	3,33	3,33	0,00	0,00	0,00	6,67	
NE		1,33	2,67	6,00	2,00	0,00	0,00	12,00	
ENE		0,00	2,00	2,67	2,67	0,00	0,00	7,33	
E		0,67	1,33	6,00	6,67	0,67	0,00	15,33	
ESE		0,00	2,00	2,00	0,67	0,67	1,33	6,67	
SE		0,00	0,00	2,67	0,67	0,00	0,00	3,33	
SSE		0,00	0,67	2,67	0,67	0,00	0,00	4,00	
S		0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	
SSW		0,00	2,67	1,33	0,00	0,00	0,00	4,00	
SW		0,67	1,33	1,33	0,67	0,00	0,00	4,00	
WSW		0,00	0,00	0,67	1,33	0,67	0,00	2,67	
W		0,67	0,00	2,67	0,67	0,00	0,00	4,00	
WNW		0,00	1,33	2,67	2,67	0,67	0,00	7,33	
NW		0,00	2,00	3,33	2,67	0,67	0,00	8,67	
NNW		0,00	3,33	1,33	1,33	0,67	0,00	6,67	
Total Percent		3,33	27,33	39,33	23,33	5,33	1,33	100,0	
Total Favorable		2,66	20,67	28,66	14,63	2,65	1,33	70,6	
		Velocidades ≥ 10 $m/s$						Velocidades ≥ 15 $m/s$	
$R_{GH} \pm 60^\circ$		47,27 %						18,61 %	
								Velocidades ≥ 20 $m/s$	
								3,98 %	



Punto A	01-15 Julio						LAT 40,25N LONG 300,25E
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0$	$10,0 \leq 15,0$	$15,0 \leq 20,0$	$20,0 \leq 25,0$	$25,0 < 25,0$	Porcentaje Total
N		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NNE		0,00	0,00	1,34	0,67	0,00	2,01
NE		0,00	0,00	1,34	0,67	0,00	2,01
ENE		0,00	0,67	2,01	0,67	0,00	3,36
E		0,67	0,67	2,01	0,00	0,00	3,36
ESE		0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67
SE		0,00	0,00	0,67	0,67	0,00	1,34
SSE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67
S		0,00	0,67	0,67	0,67	0,00	2,01
SSW		0,00	1,34	6,04	8,72	2,68	20,81
SW		0,00	2,01	13,42	16,11	1,34	32,89
WSW		0,00	1,34	6,71	6,04	0,67	14,77
W		0,67	2,01	4,70	1,34	0,00	8,72
WNW		0,00	0,67	0,67	0,67	0,00	2,01
NW		0,00	0,00	2,68	0,00	0,00	2,68
NNW		0,00	1,34	1,34	0,00	0,00	2,68
Total Percent		1,34	10,74	44,30	36,91	4,70	100,0
Total Favorable		0,67	9,4	36,93	34,9	4,70	88,61
		Velocidades $\geq 10 \text{ } m/s$				Velocidades $\geq 15 \text{ } m/s$	Velocidades $\geq 20 \text{ } m/s$
	$R_{AB} \pm 60^\circ$	78,54 %				41,6 %	6,71 %

Punto B		01-15 Julio						LAT 44,25N LONG 312,25E	
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$						Porcentaje Total	
N		0,00	2,01	0,67	0,00	0,00	0,00	2,68	
NNE		0,00	1,34	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	
NE		0,00	0,67	1,34	0,00	0,00	0,00	2,01	
ENE		0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67	
E		0,00	1,34	2,01	0,00	0,00	0,00	3,36	
ESE		0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	2,01	
SE		0,67	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	1,34	
SSE		0,00	0,67	3,36	1,34	0,00	0,00	5,37	
S		0,00	6,04	4,03	1,34	0,00	0,00	11,41	
SSW		0,00	4,03	5,37	5,37	0,00	0,00	14,77	
SW		0,00	10,07	13,42	4,03	0,00	0,00	27,52	
WSW		0,00	4,03	9,40	0,67	0,00	0,00	14,09	
W		0,00	2,01	2,01	0,67	0,00	0,00	4,70	
WNW		0,00	0,00	1,34	0,00	0,00	0,00	1,34	
NW		0,00	2,01	2,01	0,00	0,00	0,00	4,03	
NNW		0,00	2,01	1,34	0,00	0,00	0,00	3,36	
Total Percent		1,34	36,91	48,32	13,42	0,00	0,00	100,0	
Total Favorable		0,67	30,88	42,96	13,42	0,00	0,00	87,93	
		Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$						Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	
$R_{BC} \pm 60^\circ$		56,98 %						13,42 %	
								Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$	
								0 %	

Punto C		01-15 Julio						LAT 48,25N LONG 330,25E	
$DV_V$	$V_V$	5,0 ≤ 10,0 ≤ 15,0 ≤ 20,0 ≤ 25,0 < 25,0						Porcentaje Total	
N		0,00	0,67	0,67	0,00	0,67	0,00	2,01	
NNE		0,00	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	1,34	
NE		0,00	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	1,34	
ENE		0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,67	
E		0,00	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	2,01	
ESE		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SE		0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	
SSE		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
S		0,00	0,67	2,01	0,00	0,00	0,00	2,68	
SSW		0,00	2,01	4,70	2,01	0,00	0,00	8,72	
SW		0,00	1,34	8,05	4,03	0,00	0,00	13,42	
WSW		0,67	0,67	15,44	7,38	0,00	0,00	24,16	
W		0,00	1,34	6,71	7,38	2,68	0,67	18,79	
WNW		0,00	0,67	3,36	4,70	1,34	0,67	10,74	
NW		0,00	0,67	3,36	2,68	2,01	0,00	8,72	
NNW		0,00	0,67	2,68	1,34	0,00	0,00	4,70	
Total Percent		0,67	11,41	48,99	30,87	6,71	1,34	100,0	
Total Favorable		0,67	9,4	47,69	29,57	6,71	1,34	95,38	
		Velocidades ≥ 10 $m/s$						Velocidades ≥ 15 $m/s$	
$R_{CD} \pm 60^\circ$		85,31 %						37,62 %	
		Velocidades ≥ 20 $m/s$						8,05 %	

Punto E		01-15 Julio				LAT 34,25N LONG 342,25E		
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0$	$10,0 \leq 15,0$	$15,0 \leq 20,0$	$20,0 \leq 25,0$	$25,0 < 25,0$	Porcentaje Total	
N	0,00	3,36	9,40	0,67	0,00	0,00	13,42	
NNE	0,00	4,70	16,11	29,53	0,00	0,00	50,34	
NE	0,00	1,34	4,70	10,74	0,00	0,00	16,78	
ENE	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	
E	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	
ESE	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SSE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SSW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SW	0,00	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	1,34	
WSW	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	
W	0,00	2,01	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	
WNW	0,00	1,34	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	
NW	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	4,03	
NNW	2,01	5,37	0,67	0,00	0,00	0,00	8,05	
Total Percent		2,68	24,83	31,54	40,94	0,00	0,00	100,0
Total Favorable		2,68	20,14	30,87	40,94	0,00	0,00	94,63

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{EF} \pm 60^\circ$	71,81 %	40,94 %	0 %

Punto F	01-15 Julio				LAT 30,25N LONG 330,25E			
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0$	$10,0 \leq 15,0$	$15,0 \leq 20,0$	$20,0 \leq 25,0$	$25,0 < 25,0$	Porcentaje Total	
N	0,00	3,36	0,00	0,00	0,00	0,00	3,36	
NNE	0,67	8,05	5,37	0,00	0,00	0,00	14,09	
NE	1,34	14,09	24,83	7,38	0,00	0,00	47,65	
ENE	0,00	4,03	13,42	8,72	0,00	0,00	26,17	
E	0,00	0,00	1,34	0,00	0,00	0,00	1,34	
ESE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SE	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	
SSE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
S	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67	
SSW	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67	
SW	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67	
WSW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
W	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
WNW	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	
NW	0,67	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	2,01	
NNW	0,00	2,01	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	
Total Percent	2,68	33,56	47,65	16,11	0,00	0,00	100,0	
Total Favorable	2,68	32,89	46,31	16,11	0,00	0,00	97,97	

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{FG} \pm 60^\circ$	62,4 %	16,1 %	0 %

Punto G		01-15 Julio						LAT 28,25N LONG 318,25E	
$DV_V$	$V_V$	5,0 ≤ 10,0 ≤ 15,0 ≤ 20,0 ≤ 25,0 < 25,0						Porcentaje Total	
N		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NNE		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NE		1,34	4,70	3,36	1,34	0,00	0,00	10,74	
ENE		0,67	6,71	28,86	4,03	0,00	0,00	40,27	
E		0,00	6,04	25,50	1,34	0,00	0,00	32,89	
ESE		1,34	4,03	3,36	0,00	0,00	0,00	8,72	
SE		0,00	2,01	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	
SSE		1,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	
S		0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	
SSW		0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67	
SW		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
WSW		0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67	
W		0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,67	
WNW		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NW		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NNW		0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	
Total Percent		5,37	24,83	63,09	6,71	0,00	0,00	100,0	
Total Favorable		5,37	24,16	61,75	6,71	0,00	0,00	97,99	

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{GH} \pm 60^\circ$	68,46 %	6,71 %	0 %

Punto A

01-15 Octubre

LAT 40,25N LONG 299,75E

$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$						Porcentaje Total
N		0,00	0,00	1,21	1,82	0,00	0,00	3,03
NNE		0,00	0,00	1,82	1,82	0,61	0,00	4,24
NE		0,00	0,00	3,64	1,82	0,61	0,00	6,06
ENE		0,00	0,61	1,82	1,21	1,82	0,61	6,06
E		0,00	1,82	3,03	0,61	3,03	0,00	8,48
ESE		0,00	0,61	0,61	2,42	0,61	0,00	4,24
SE		0,00	0,61	1,21	1,82	0,00	0,00	3,64
SSE		0,00	0,00	0,00	1,82	0,61	0,00	2,42
S		0,00	1,82	0,61	1,21	3,03	0,00	6,67
SSW		0,00	1,21	1,82	1,82	1,82	0,00	6,67
SW		0,00	0,00	3,03	2,42	2,42	0,00	7,88
WSW		0,00	0,00	0,61	2,42	1,21	0,00	4,24
W		0,00	0,61	3,64	3,64	2,42	0,00	10,30
WNW		0,00	1,21	1,82	4,24	0,61	1,82	9,70
NW		0,00	0,61	2,42	7,88	2,42	0,61	13,94
NNW		0,00	0,00	1,21	1,21	0,00	0,00	2,42
Total Percent		0,00	9,09	28,48	38,18	21,21	3,03	100
Total Favorable		0,00	6,05	16,35	31,48	14,53	2,42	70,83

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{AB} \pm 60^\circ$	64,78 %	48,43 %	16,95 %



Punto B

01-15 Octubre

LAT 44,25N LONG 312,25E

$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$						Porcentaje Total
N		0,00	0,00	1,82	1,21	0,00	0,00	3,03
NNE		0,00	0,61	0,00	0,61	0,00	0,00	1,21
NE		0,00	0,00	1,21	0,61	0,00	0,00	1,82
ENE		0,00	1,21	0,00	1,21	0,00	0,00	2,42
E		0,00	0,61	1,21	0,00	0,00	0,00	1,82
ESE		0,00	1,21	1,82	0,61	0,00	0,00	3,64
SE		0,00	0,61	2,42	0,61	0,00	0,00	3,64
SSE		0,00	0,61	3,03	0,00	0,00	0,00	3,64
S		0,00	0,00	2,42	1,21	0,61	0,00	4,24
SSW		0,00	0,00	2,42	3,03	1,21	0,00	6,67
SW		0,00	0,00	0,61	6,06	1,82	0,00	8,48
WSW		0,00	0,00	0,61	4,24	3,03	1,21	9,09
W		0,00	0,61	2,42	10,91	7,27	1,21	22,42
WNW		0,00	0,00	3,03	3,64	3,64	0,00	10,30
NW		0,00	0,00	2,42	6,06	0,00	0,00	8,48
NNW		0,00	1,21	1,82	3,03	1,21	1,82	9,09
Total Percent		0,00	6,67	27,27	43,03	18,79	4,24	100
Total Favorable		0,00	3,03	21,21	38,79	18,79	4,24	86,06

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{BC} \pm 60^\circ$	83 %	61,82 %	23 %

Punto C		01-15 Octubre						LAT 48,25N LONG 330,25E	
$DV_V$	$V_V$	$5,0 \leq 10,0 \leq 15,0 \leq 20,0 \leq 25,0 < 25,0$						Porcentaje Total	
N		0,00	0,00	0,61	3,03	0,00	0,00	3,64	
NNE		0,00	0,61	1,21	1,21	1,82	0,00	4,85	
NE		0,00	0,00	1,21	2,42	0,00	0,00	3,64	
ENE		0,00	0,00	0,00	2,42	0,00	0,00	2,42	
E		0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,00	0,61	
ESE		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SE		0,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,61	
SSE		0,00	0,00	0,00	1,21	0,00	0,00	1,21	
S		0,00	0,61	0,00	3,64	0,61	0,00	4,85	
SSW		0,00	0,00	1,82	2,42	3,03	0,61	7,88	
SW		0,00	0,61	1,21	5,45	3,64	0,00	10,91	
WSW		0,00	0,00	1,21	4,24	9,70	1,21	16,36	
W		0,00	0,00	1,82	6,67	9,09	2,42	20,00	
WNW		0,00	1,21	1,21	4,24	6,67	1,82	15,15	
NW		0,00	0,00	1,21	2,42	0,00	0,00	3,64	
NNW		0,00	0,61	0,00	3,03	0,61	0,00	4,24	
Total Percent		0,00	3,64	12,12	42,42	35,76	6,06	100,0	
Total Favorable		0,00	3,64	10,3	36,37	35,15	6,06	91,52	
		Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$		Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$		Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$			
$R_{CD} \pm 60^\circ$		87,88 %		77,58 %		41,21 %			

Punto E

01-15 Octubre

LAT 34,25N LONG 342,25E

$DV_V$	$V_V$	5,0 ≤ 10,0	10,0 ≤ 15,0	15,0 ≤ 20,0	20,0 ≤ 25,0	25,0 < 30,0	Porcentaje Total
N	0,61	1,82	4,24	2,42	0,00	0,00	9,09
NNE	1,21	3,03	6,06	6,67	2,42	0,00	19,39
NE	0,00	3,64	5,45	5,45	1,21	0,00	15,76
ENE	0,00	4,24	6,06	0,00	0,00	0,00	10,30
E	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61
ESE	1,21	0,00	1,82	0,00	0,00	0,00	3,03
SE	0,00	0,61	0,00	1,21	0,00	0,00	1,82
SSE	0,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,61
S	0,00	1,21	0,61	0,00	0,00	0,00	1,82
SSW	0,00	0,61	1,21	2,42	0,00	0,00	4,24
SW	1,21	0,00	3,03	0,61	0,00	0,00	4,85
WSW	0,00	0,00	2,42	0,00	0,00	0,00	2,42
W	0,61	0,61	2,42	0,61	0,00	0,00	4,24
WNW	0,61	1,21	1,82	2,42	0,00	0,00	6,06
NW	0,61	4,24	1,82	0,61	0,00	0,00	7,27
NNW	0,61	1,82	3,64	2,42	0,00	0,00	8,48
Total Percent	6,67	23,64	41,21	24,85	3,64	0,00	100,0
Total Favorable	4,25	21,22	30,31	18,79	3,64	0,00	78,21

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{EF} \pm 60^\circ$	52,74 %	22,43 %	3,64 %

Punto F      01-15 Octubre      LAT 30,25N LONG 330,75E

$DV_V$	$V_V$	5,0 ≤ 10,0	10,0 ≤ 15,0	15,0 ≤ 20,0	20,0 ≤ 25,0	25,0 < 30,0	Porcentaje Total
N		1,21	3,03	3,03	0,00	0,00	7,27
NNE		0,00	2,42	2,42	0,00	0,00	4,85
NE		0,00	4,24	9,70	1,82	0,00	15,76
ENE		0,00	4,24	7,27	9,70	1,21	22,42
E		0,00	4,85	4,24	1,21	0,00	10,30
ESE		0,00	3,03	1,82	0,61	0,00	5,45
SE		0,00	1,21	1,82	0,61	0,00	3,64
SSE		0,00	1,21	4,24	1,21	0,00	6,67
S		0,00	1,82	1,21	0,00	1,21	4,24
SSW		0,61	0,61	0,61	0,00	0,61	2,42
SW		0,00	1,21	0,00	0,00	0,00	1,21
WSW		0,00	2,42	0,00	2,42	0,00	4,85
W		0,00	0,00	0,00	0,61	0,00	0,61
WNW		0,00	2,42	1,82	0,00	0,00	4,24
NW		0,00	1,82	0,61	1,21	0,00	3,64
NNW		0,00	1,82	0,00	0,61	0,00	2,42
Total Percent		1,82	36,36	38,79	20,00	3,03	100,0
Total Favorable		0,61	29,7	36,36	16,97	2,42	86,06

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{FG} \pm 60^\circ$	55,75 %	19,39 %	2,42 %

Punto G

01-15 Octubre

LAT 28,25N LONG 318,25E

$DV_V$	$V_V$	5,0 ≤ 10,0	10,0 ≤ 15,0	15,0 ≤ 20,0	20,0 ≤ 25,0	25,0 < 30,0	Porcentaje Total
N		0,00	3,64	0,00	0,00	0,00	3,64
NNE		0,61	1,82	0,61	0,61	0,00	3,64
NE		0,00	3,64	6,67	1,82	0,00	12,12
ENE		0,61	1,21	6,06	6,06	0,00	13,94
E		0,00	0,00	10,91	4,24	0,00	15,15
ESE		0,00	2,42	4,24	2,42	0,00	9,09
SE		0,00	1,21	6,06	0,61	0,61	8,48
SSE		1,21	2,42	1,82	0,61	0,00	6,06
S		0,00	0,61	1,21	0,61	0,00	2,42
SSW		0,00	1,21	1,82	1,21	0,00	4,24
SW		1,21	1,82	1,82	0,00	0,00	4,85
WSW		0,00	1,82	0,00	0,61	0,00	2,42
W		0,61	1,82	2,42	0,61	0,00	5,45
WNW		0,00	1,21	1,21	0,00	0,00	2,42
NW		0,00	1,82	2,42	0,00	0,00	4,24
NNW		0,00	1,21	0,00	0,61	0,00	1,82
Total Percent		4,24	27,88	47,27	20,00	0,61	100,0
Total Favorable		3,63	20	41,22	18,17	0,61	83,63

	Velocidades $\geq 10 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 15 \text{ m/s}$	Velocidades $\geq 20 \text{ m/s}$
$R_{GH} \pm 60^\circ$	60 %	18,78 %	0,61 %